UNTERSUCHUNGEN ÜBER EIN DOPPELT INDUKTIV GEKOPPELTES EMPFANGSSYSTEM FÜR DRAHTLOSE TELEGRAPHIE.

(MITTEILUNGEN DER PHYSIKALISCHEN VERSUCHS-STATION HALLE-CRÖLLWITZ.)

(No. 17.)

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG

ACAD. LUCUBRAT. BIBL.

VORGELEGT VON

GUSTAV HEINECKE

AUS MAGDEBURG.

HALLE A. S.

HOFBUCHDRUCKEREI VON C. A. KAEMMERER & CO.

1909.

Referent: Geh. Regierungsrat Prof. Dr. **Dorn.**

Inhaltsangabe.

Seite

Einleitung 5

Teil I.

§ 1. Das Empfangssystem 6
§ 2. Die Untersuchung der Antennen 13
§. 3. Untersuchung des doppelt induktiv gekoppelten Empfangssystems 18

Teil II.

Untersuchungen über die Abhängigkeit der Strahlung von der Kopplung des Induktors 27

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548124_0054

Einleitung.

Der erste Teil der in folgendem dargelegten Untersuchungen ist ausgeführt in einer 8 km von der Versuchsstation Halle-Cröllwitz (Sendestation) gelegenen Empfangsstation. Von der Sendestation werden elektrische Wellen unter vielfach geänderten Versuchsbedingungen ausgesandt und in dem Empfangssystem, das für alle Versuche die gleiche Anordnung behielt, aufgenommen.

Es sollte nun ermittelt werden

1. welche Anordnungen des Empfängers ein Maximum der Wirkung ergeben;
2. mit welchem Grad von Zuverlässigkeit und Genauigkeit die Messungen, die zur Bestimmung der Intensität und Dämpfung der ankommenden elektrischen Wellen dienen, ausgeführt werden können.

Im zweiten Teil der Arbeit sind Versuche über die Abhängigkeit der Strahlung von der Stärke der Kopplung mitgeteilt, mit welcher der Sekundärkreis des bei den Untersuchungen benutzten Resonanzinduktors an den Maschinenkreis angeschlossen ist.

Teil I.

§ 1.

Das Empfangssystem.

Das Antennensystem der Empfangsstation, auf der vorliegende Untersuchungen ausgeführt worden sind, besteht aus einer Vertikal- und Horizontalantenne. Bei den ersten Versuchen waren beide Harfen von genau derselben Gestalt und Grösse. Sie wurden gebildet von zehn parallelen, 20 m langen Phosphorbronzelitzen im Abstande von 1 m. Die Enden der Drähte waren durch Aluminiumrohre miteinander verbunden. Die Vertikalharfe hing zwischen zwei 30 m hohen Masten, die eine Spannweite von 28 m besitzen. Zwischen den Mastspitzen war ein Querseil aufgehängt, das durch Deltaglocken, die ca. 2 m von den Masten entfernt waren, gut isoliert war. An diesem Querseil war die eine Aluminiumröhre ohne jede weitere Isolation befestigt. Das untere Ende der Harfe befand sich ca. 9 m über der Erdoberfläche.

Die Horizontalharfe ist zwischen sechs Masten in der Richtung nach der Sendestation ausgespannt. Sie ist durch Deltaglocken und Kreuzisolatoren von den Masten isoliert. Das Terrain, auf dem sie steht, ist sehr uneben; ungefähr in der Mitte unter der Horizontalharfe befindet sich eine Erhebung, durch Felsen gebildet. Dann fällt das Terrain nach dem einen Ende der Harfe zu um ca. 2 m, nach dem andern um ca. $^1/_2$ m. Figur 1 gibt ein Bild dieser Verhältnisse. Der Abstand der Horizontalantenne vom Erdboden variiert also ziemlich stark.

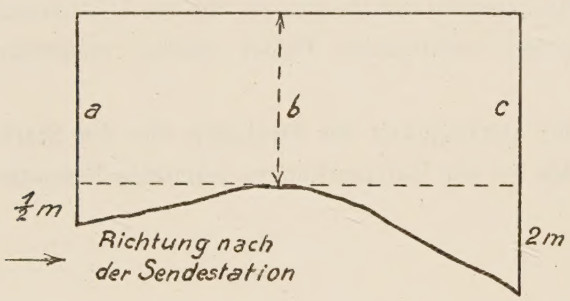


Fig. 1.

Das Antennensystem in der eben beschriebenen Form war dem der Sendestation ganz analog gebaut und war das genaue Spiegelbild des Sendesystems.

Das eigentliche Empfangssystem ist ein doppelt induktiv gekoppeltes, besteht also aus drei Kreisen:

1. dem Antennenkreis, der die beiden Antennen enthält, zwischen denen Induktionsspulen liegen, die zum Teil auf einem Schlitten angeordnet sind, und deren Induktionskoeffizient leicht geändert werden kann;
2. dem Messkreis, der sich aus Induktionsspulen und einem variablen Drehkondensator zusammensetzt;
3. dem Barretterkreis, der ausser einer Induktionsspule und einem Glimmerkondensator von ca. 50000 cm Kapazität einen empfindlichen Barretter enthält.

Fig. 2 gibt einen Überblick über das Gesamtsystem. Die Induktionsspulen a und b haben einen Durchmesser von 39 cm, sie bestehen aus 36 Windungen von blankem Kupferdraht von 2,8 mm Stärke, der Abstand der einzelnen Windungen beträgt 4 mm. Sie sind aufgewickelt auf sechs parallelen Ebonitstegen, die senkrecht zu den Windungen stehen. Jede Windung wird durch die Ebonitstege, die mit A, B, C, . . F bezeichnet sind, in sechs gleiche Teile zerlegt. Man ist so in der Lage, jeden Punkt der Spule genau angeben zu können. Wir bezeichnen z. B. mit D_{16} die Stelle der sechzehnten Windung

am Stege D. Die erste Windung beginnt beim Stege A, sodass bei D_{16} von jeder Spule $16^3/_6$ Windungen eingeschaltet sind.

Die übrigen benutzten Induktionsspulen haben einen Durchmesser von 25 cm, ihre Windungszahl ist 12 bei einem Windungsabstande von 2 mm. Auch sie sind aus blankem Kupferdraht von 2,8 mm Durchmesser hergestellt, ihr Selbstinduktionskoeffizient beträgt ca. 50000 cm.

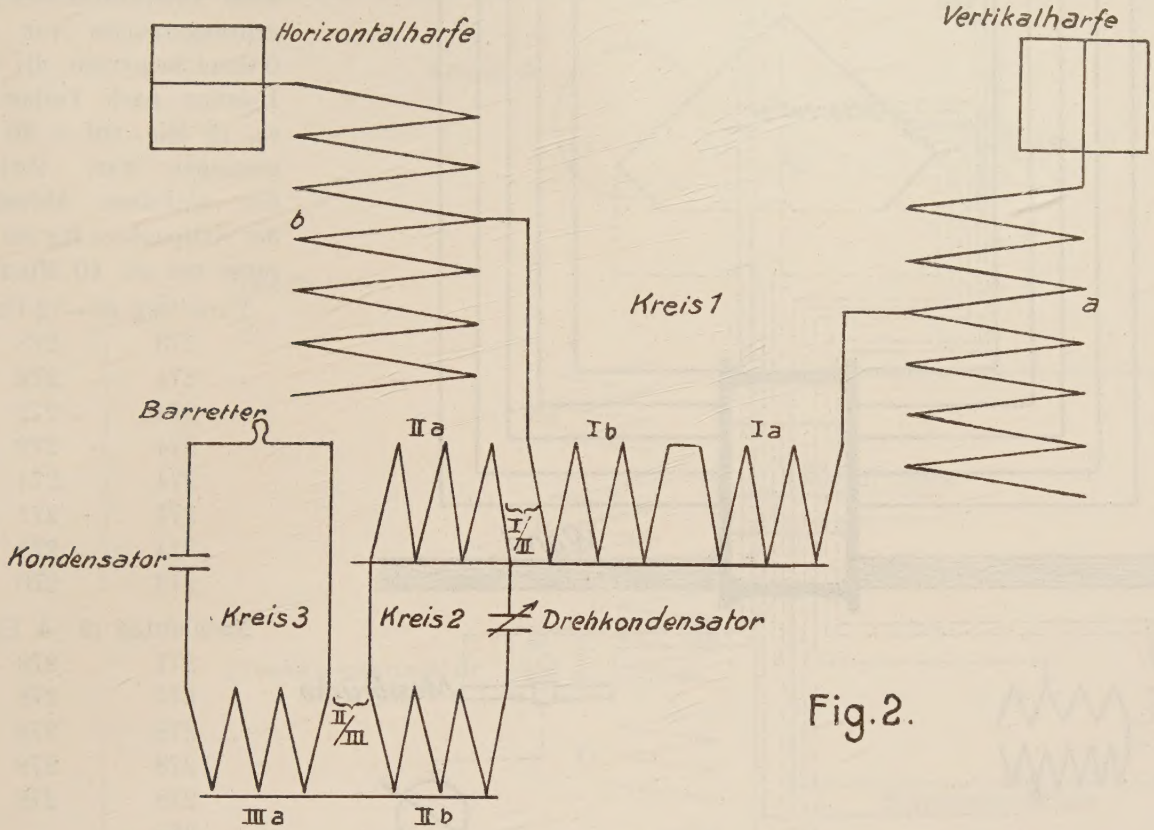


Fig. 2.

Die in Fig. 2 mit Ia, Ib und IIa bezeichneten Spulen stehen auf ein und demselben Schlitten, um ein bequemes Mittel zur Variierung des Abstandes der einzelnen Spulen in der Hand zu haben. Auf einem zweiten Schlitten sind die mit IIb und IIIa bezeichneten Spulen angeordnet, um auch ihren Abstand genau ändern zu können.

Die spezielle Schaltung des Barretters ist in folgendem dargelegt. Um sichere Beobachtungen mit diesem Messinstrumente machen zu können, müssen Nullpunktsschwankungen von vornherein ausgeschlossen sein. Dieselben werden vermieden, wenn man äussere Temperaturschwankungen von dem Barretter fernhält. Dazu wird das den Barretter enthaltende Glasgefäss in ein Ölbad gesetzt, wodurch schon eine gute Konstanz des Nullpunktes erreicht wird. Um aber so gut wie sicher vor äusseren Temperatureinflüssen auf den Baretter zu sein, ist auf der Empfangsstation folgende Einrichtung getroffen. Der Barretter befindet sich in fünf ineinander gebauten Kisten, von denen die vier äusseren einen gegenseitigen Abstand von 10 cm haben, die innerste enthält die Barretterkombination. Die äusserste Kiste hat eine Abmessung von $1 \times 1 \times 1{,}25$ m^3 und ist an der Ostseite des Beobachtungshäuschens aufgestellt unter einem kleinen Pavillon. Fig. 3 zeigt schematisch die Anordnung der Barretterschaltung.

Durch diesen Einbau des Barretters ist er vor den unvermeidlichen Schwankungen der Temperatur in dem Beobachtungsraum und der Atmosphäre gesichert, die namentlich im Sommer und im Winter (Heizung) sehr beträchtlich sind.

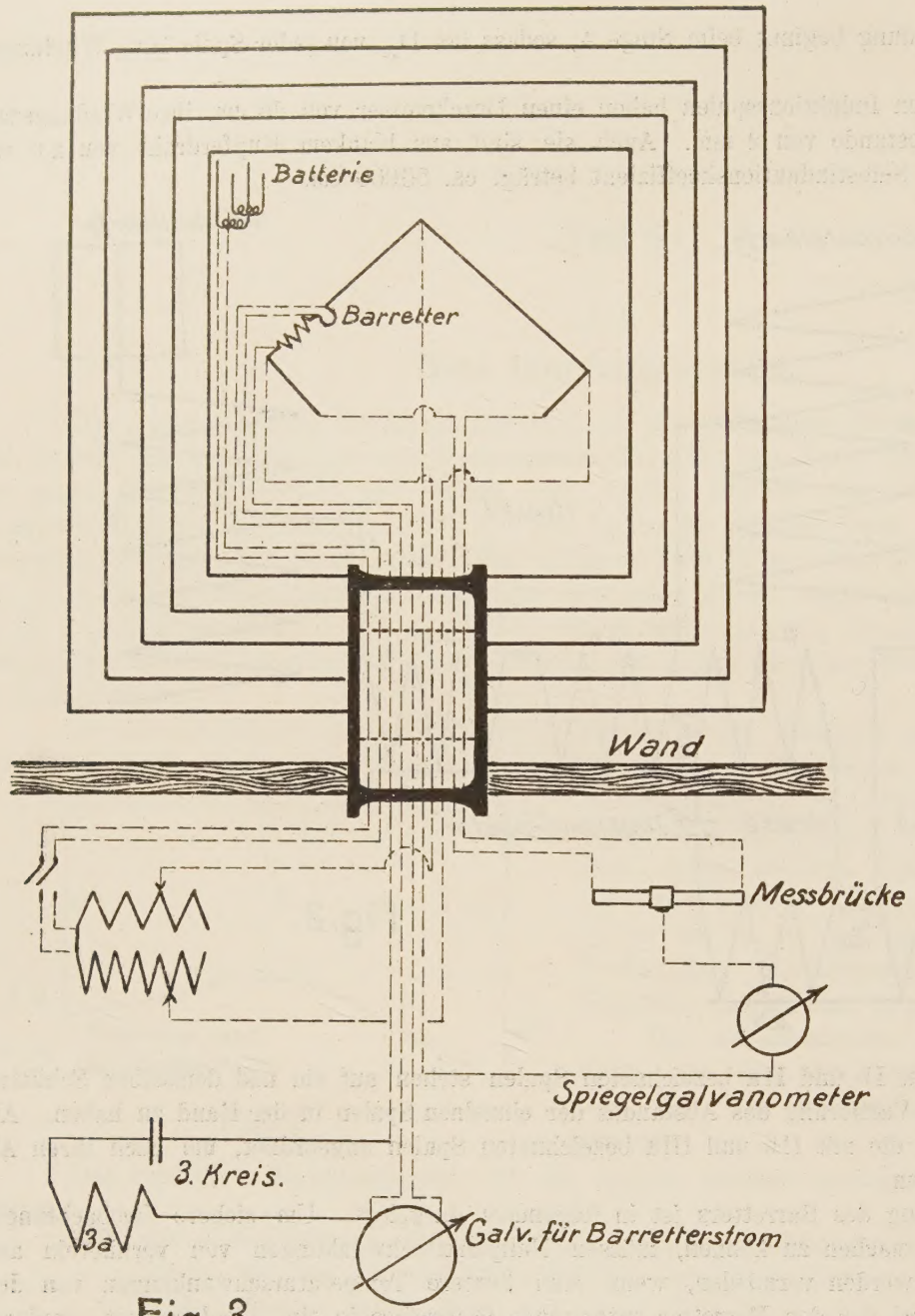


Fig. 3. Barretterschaltung.

Folgende Zahlen geben den Nullpunkt des Barretters an bei den Beobachtungen vom 9. Januar 1909. Die Untersuchungen wurden bei einer Temperatur des Beobachtungsraumes von unter 0 Grad begonnen, die durch Heizung nach Verlauf von ca. 15 Min. auf + 20 Grad gestiegen war. Zwischen den einzelnen Ablesungen des Nullpunktes lag ein Zeitraum von ca. 10 Minuten.

Vormittag (9—12 Uhr).

273	273
274	272
274	272
274	272
274	271
274	271
274	271
273	270

Nachmittag (2—4 Uhr).

277	278
277	278
278	278
278	278
278	278
278	

Auch an Tagen, wo die Beschaffenheit der Atmosphäre stark wechselte, war der Barretter vor diesen Schwankungen vollkommen gesichert, wie die in der folgenden Tabelle angegebenen Zahlen bei einer Versuchsreihe vom 21. Mai 1908 beweisen.

	Wetterangabe.	Nullpunkt.
Kurve 1.	Bedeckter Himmel, schwacher Wind. (9^{25} Uhr.)	431, 431, 431.
Kurve 2.	Himmel etwas aufgehellt, Temperatur höher. (9^{55} Uhr.)	431, 430, 429.
Kurve 3.	Himmel heller, teilweise Sonnenschein, windiger. (10^{35} Uhr.)	428, 427, 427, 426.
Kurve 4.	Sonnenschein, sehr windig. (10^{55} Uhr.)	426, 425, 425, 424.
Kurve 5.	Himmel vollkommen aufgehellt, Wind sehr stark. (11^{35} Uhr.)	423, 423, 423.
Kurve 6.	Dasselbe wie bei 5. (12^{00} Uhr.)	422, 422, 421.

Die Konstanz des Barretternullpunktes ist also sehr gut. Auch an anderen Tagen, wo die atmosphärischen Verhältnisse ebenfalls stark und plötzlich sich änderten, blieb der Barretternullpunkt konstant. Plötzliche Schwankungen desselben kamen absolut nicht vor.

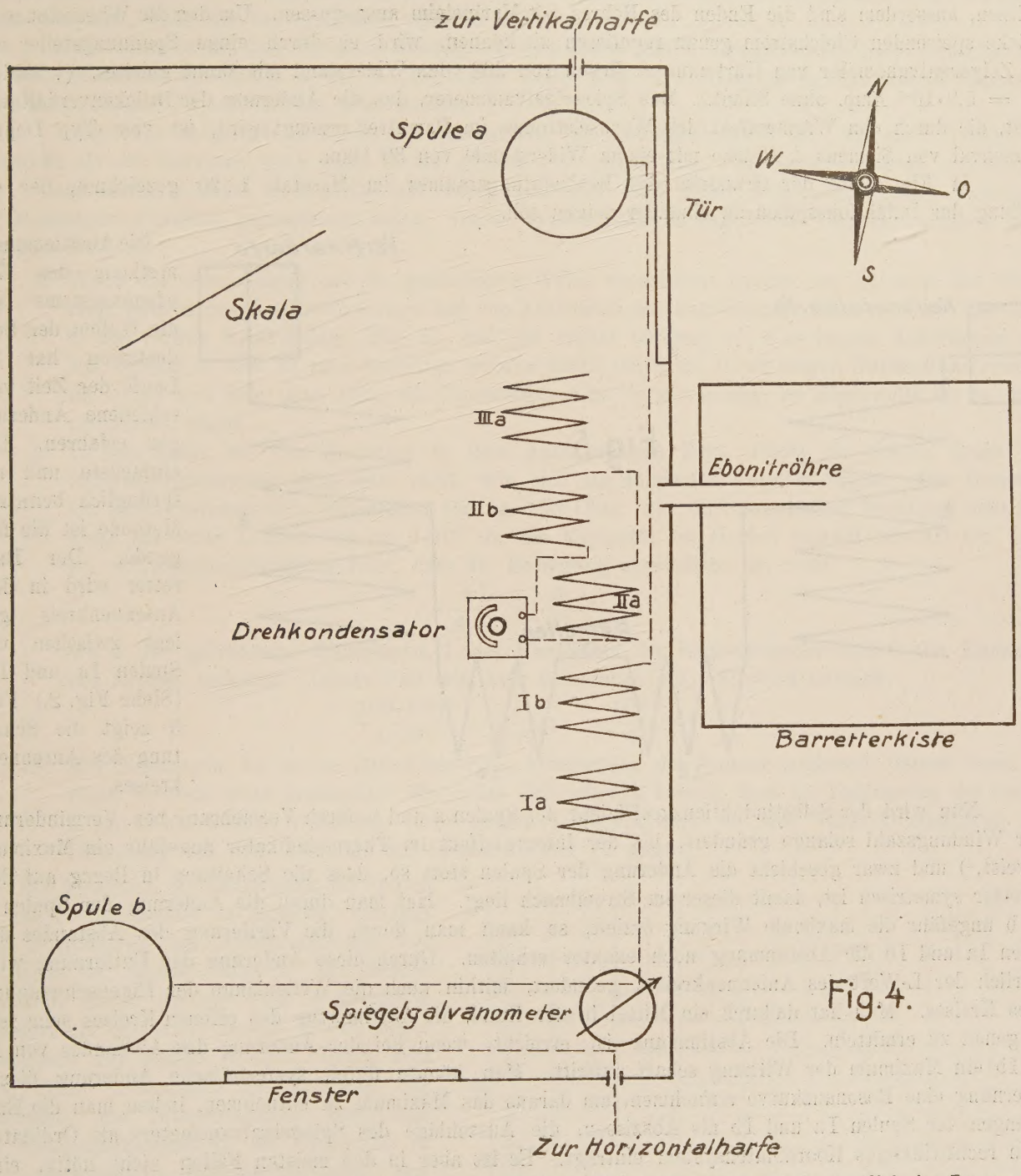


Fig. 4.

Die zum Arbeiten mit dem Barretter notwendigen Messinstrumente sind sämtlich im Innern des Beobachtungsraumes aufgestellt. Nur die zum Betriebe des Barretters nötige Batterie befindet sich in der Kistenkombination, um auch sie vor Temperaturschwankungen zu bewahren. Die Zuführungen von den im Innern des Häuschens sich befindenden Instrumenten zum Barretter werden durch eine Hart-

gummiröhre in die Kiste geleitet. Sie bestehen aus Manganinlitze, weil Manganin seinen galvanischen Widerstand mit der Temperatur nur wenig ändert. Um eine Berührung der Drähte auszuschliessen, sind in die Ebonitröhre Querscheiben eingesetzt, die für jeden einzelnen Draht eine Durchbohrung besitzen, ausserdem sind die Enden des Rohres mit Marineleim ausgegossen. Um den die Wheatstonesche Brücke speisenden Gleichstrom genau regulieren zu können, wird er durch einen Spannungsteiler und ein Zeigergalvanometer von Hartmann & Braun von 202 Ohm Widerstand mit Shunt geleitet. (1 Skalenteil = $5{,}9 \cdot 10^{-6}$ Amp. ohne Shunt.) Das Spiegelgalvanometer, das die Änderung der Brückenverhältnisse misst, die durch den Wärmeeffekt des Wechselstromes im Barretter erzeugt wird, ist vom Typ Deprez d'Arsonval von Siemens & Halske mit einem Widerstande von 30 Ohm.

In Fig. 4 ist der Grundriss des Beobachtungsraumes im Masstab 1 : 20 gezeichnet, der die Stellung der Induktionsspulen zu einander zeigen soll.

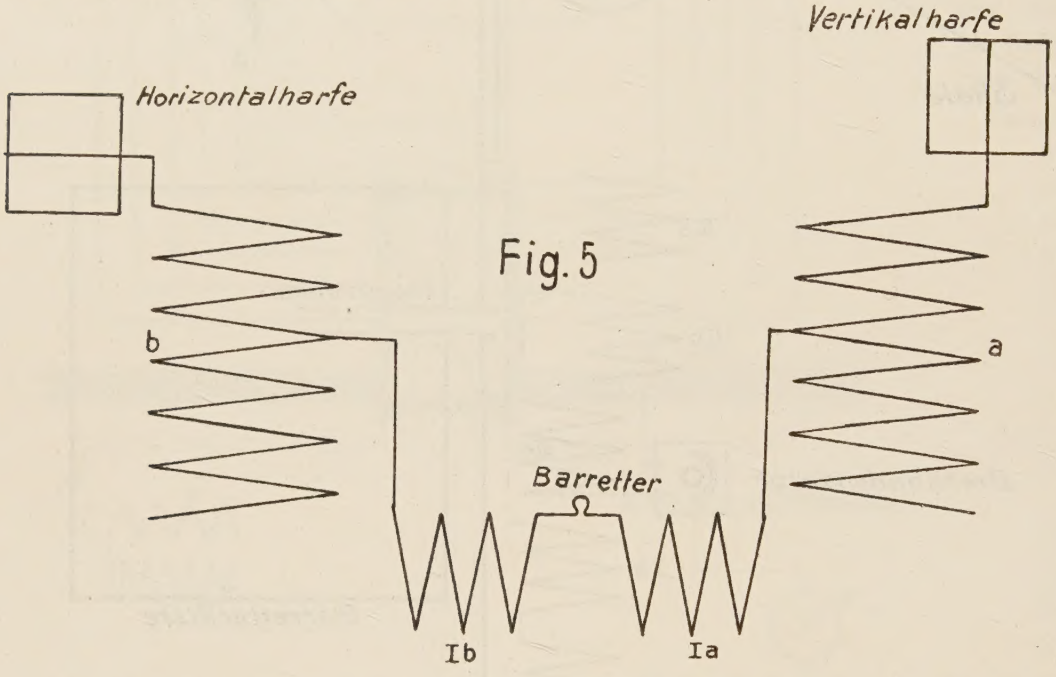


Fig. 5

Die Abstimmungsmethode des Empfangssystems auf die Wellen der Sendestation hat im Laufe der Zeit verschiedene Änderungen erfahren. Die einfachste und ursprünglich benutzte Methode ist die folgende. Der Barretter wird in den Antennenkreis gelegt zwischen die Spulen Ia und Ib. (Siehe Fig. 2.) Fig. 5 zeigt die Schaltung des Antennenkreises.

Nun wird der Selbstinduktionskoeffizient der Spulen a und b durch Vermehrung bez. Verminderung ihrer Windungszahl solange geändert, bis der Integraleffekt im Thermoindikator ungefähr ein Maximum aufweist,[1]) und zwar geschieht die Änderung der Spulen stets so, dass die Schaltung in Bezug auf den Barretter symetrisch ist, damit dieser im Strombauch liegt. Hat man durch die Änderung der Spulen a und b ungefähr die maximale Wirkung erzielt, so kann man durch die Variierung des Abstandes der Spulen Ia und Ib die Abstimmung noch exakter erhalten. Durch diese Änderung der Entfernung wird natürlich der L-Wert des Antennenkreises geändert, mithin auch die Wellenlänge der Eigenschwingung dieses Kreises. Man hat dadurch ein Mittel in der Hand, die Abstimmung des offenen Kreises sehr fein und genau zu ermitteln. Die Abstimmung ist erreicht, wenn bei der Änderung des Abstandes von Ia und Ib ein Maximum der Wirkung scharf auftritt. Man könnte durch systematische Änderung dieser Entfernung eine Resonanzkurve aufnehmen, um daraus das Maximum zu entnehmen, indem man die Entfernungen der Spulen Ia und Ib als Abszissen, die Ausschläge des Spiegelgalvanometers als Ordinaten in ein rechtwinkliges Koordinatensystem einträgt. Es ist aber in den meisten Fällen nicht nötig, eine

---

1) Die Koppelspulen Ia und Ib bleiben ungeändert. Nur in dem Falle, wo mit Wellen unter 324 m gearbeitet wird, muss die Windungszahl dieser Spulen geändert werden. Die Wellenlänge der Eigenschwingung des Antennenkreises, wenn die Spulen a und b herausgenommen sind, beträgt nämlich: $2\pi \cdot \sqrt{10^5 \cdot 3 \cdot 10^2} = 324$ m.

solche Kurve aufzunehmen, da das Optimum innerhalb ziemlich enger Verschiebungsweiten (2 cm) der Induktionsspulen liegt, wenn diese nicht weiter als ca. 15 cm von einander entfernt sind. Bei grösserem Spulenabstand verändert naturgemäss die Variierung dieses Abstandes den L-Wert nicht mehr so stark als in dem Fall, wenn die beiden Spulen einander näher stehen.

Man ist imstande, das Optimum beliebig zu verschieben durch Vergrösserung oder Verkleinerung der Selbstinduktion der Spulen a und b. Im ersten Falle wird das Optimum bei grösserem Abstande der Spulen Ia und Ib erreicht als beim zweiten.

Diese eben dargelegte Methode zur Abstimmung des Antennenkreises, die für viele Zwecke — besonders als der Barretter noch nicht in der grossen Entfernung von den Antennenspulen angebracht war — ausreichte, genügte nicht mehr, als durch Barretter sehr hoher Empfindlichkeit die Exaktheit der Messungen erheblich zugenommen hatte. Durch systematisch durchgeführte Versuche ergaben sich folgende Nachteile:

1. Wenn der offene Kreis auf die geschilderte Weise abgestimmt worden ist, so wird der Messkreis mittels des Drehkondensators auf den Antennenkreis abgestimmt. Dazu wird der Barretter in den dritten Kreis gelegt (Fig. 2), und die vorher nötigen, ca. 4 m langen Zuleitungen von den Spulen Ia und Ib zum Barretter werden durch einen ca. 10 cm langen Kupferdraht ersetzt. Es zeigte sich nun, dass durch die Zuleitungen eine Vergrösserung der Eigenwelle um ca. 30 m verursacht wurde.
2. In dem Falle, wo der Barretter in dem Antennenkreis liegt, findet in diesem Kreise ein Schwingungsvorgang nicht mehr statt, wie sich aus folgenden Angaben ergibt. Der Barretter hat einen galvanischen Widerstand von ca. 100 Ohm, die durchschnittlich benutzte Abstimmspule hat einen L-Wert von ca. $3 \cdot 10^5$ cm, die Kapazität der Harfen beträgt ca. 300 cm. Aus der Schwingungsgleichung folgt, dass die Bewegung aperiodisch ist, wenn
$$\frac{w^2}{4\,L} > \frac{1}{C}$$
wo w der galvanische Widerstand, L der Koeffizient der Selbstinduktion und C die Kapazität des Kreises bedeutet. Dieser Fall tritt hier tatsächlich auf. Es wird nämlich:
$$\frac{(100 \cdot 10^9)^2}{4 \cdot 10^5} > \frac{1}{3 \cdot 10^2}; \qquad \frac{10^{17}}{4} > 1.$$
3. Für Messungen, bei denen fortwährend die Abstimmung des Systems geändert werden muss, ist diese Methode nicht brauchbar. Es stellte sich nämlich heraus, dass die Entfernung der Spulen a und b bei solchen Versuchen nicht geändert werden darf, da sich eine Abhängigkeit der Dämpfung von dem Abstande der Spulen Ia und Ib zeigte.

Die Nötigung, die Entfernung der Spulen Ia und Ib ungeändert zu erhalten, verlangt eine Abstimmung des Antennenkreises nur mit Hilfe der Spulen a und b. Die Selbstinduktion dieser Spulen wird systematisch geändert um bestimmte gleiche Werte, immer symetrisch auf beiden Seiten. Trägt man dann diese Änderungen des L-Wertes als Abszissen, die entsprechenden Ausschläge des Spiegelgalvanometers als Ordinaten in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so erhält man eine Kurve, aus der man das Maximum der Wirkung entnehmen kann. Fig. 6 zeigt eine solche Kurve. Die Unterschiede der Abszissen betragen je $^1/_6$ Windung

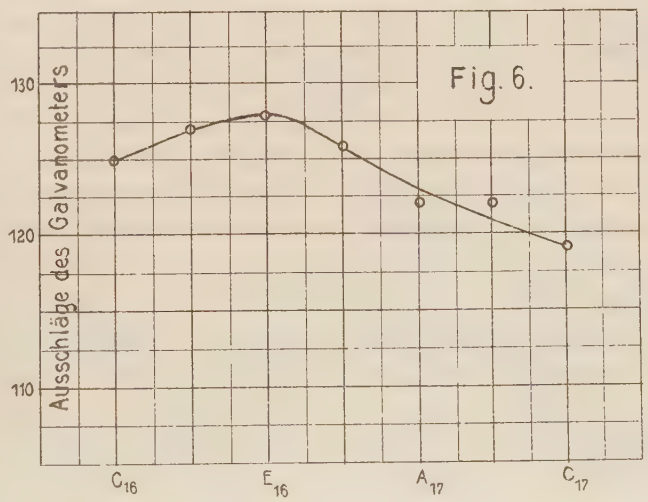


Fig. 6.

der Spulen a und b, die Kurve erstreckt sich also über je eine Windung von a und b, was einer Vermehrung des L-Wertes um ca. 20000 cm entspricht; die Eigenschwingung des Antennenkreises ändert sich dabei um ca. 30 m. Wie man sieht, sind die Unterschiede der einzelnen Ordinaten sehr gering, infolgedessen rufen Schwankungen in den Galvanometerausschlägen merkliche Ungenauigkeiten hervor.

Eine wesentliche Verbesserung und grössere Exaktheit der Abstimmung ergab folgende, von dem Assistenten des Herrn Prof. Schmidt, Herrn Diploming. Ullrich, angegebene Methode. Der den Barretter enthaltende Kreis wird induktiv an den Antennenkreis gekoppelt. In Fig. 7 ist die Schaltungsanordnung wiedergegeben.

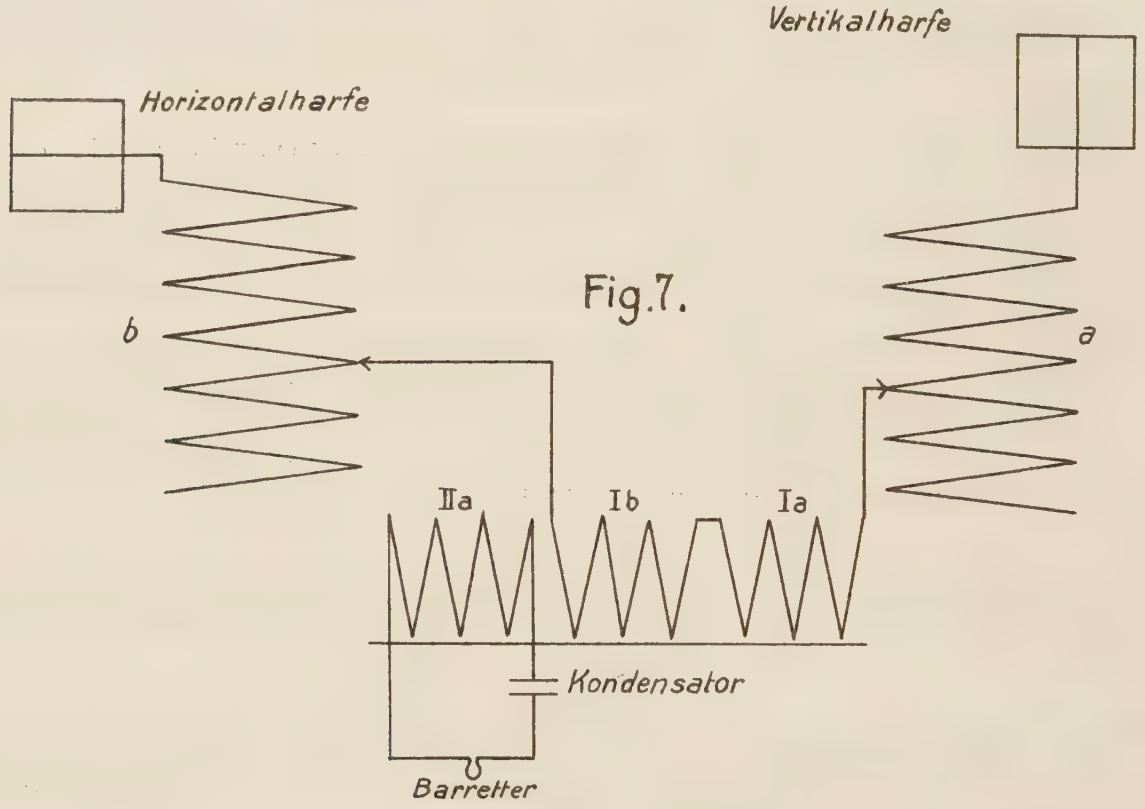


Fig. 7.

Die Spulen Ia und Ib werden durch einen Kupferdraht verbunden. Der Kreis, in dem der Barretter sich befindet, enthält noch die Koppelspule IIa und den Glimmerkondensator. Die Abstimmung des Antennenkreises wird erreicht durch Änderung der Spulen a und b. Nimmt man jetzt wieder eine Kurve auf, so erhält man die in Fig. 8 abgebildete. Zum Vergleich ist die Kurve in Fig. 6 in demselben Masstab beigefügt. Man erkennt, dass die jetzige Kurve ungleich günstiger ist, da die Unterschiede der Galvanometerausschläge hier bedeutend grösser sind. Das Maximum ist scharf und genau aus der Kurve zu ersehen, selbst bei grösseren Schwankungen der Galvanometerausschläge. Die Figur zeigt weiter, dass die Maxima der beiden Abstimmungskurven erheblich von einander abweichen, und zwar liegen sie um je $^5/_6$ Windung der Spulen a und b auseinander. Diese Abweichung rührt einzig und allein her von der Wirkung der Zuleitungen von den Spulen Ia und Ib zum Barretter.

Nachdem mittels dieser Methode der Antennenkreis scharf und exakt abgestimmt worden ist, wird der Messkreis mit Hilfe des Drehkondensators auf den offenen Kreis abgestimmt. (Schaltung siehe Fig. 2.) Der Barretterkreis wird nicht abgestimmt, er bleibt für alle Messungen konstant und hat eine Eigenschwingung von ca. 3000 m. Es würde in ihm eine erzwungene Schwingung auftreten, wenn von einer Schwingung überhaupt noch die Rede sein könnte. Bei dem grossen Barretterwiderstand tritt, wie

schon oben angegeben worden ist (Seite 12), nur noch eine aperiodische Bewegung auf. Die Grösse der Kapazität und der Selbstinduktion des Barretterkreises muss auf Grund ausführlicher Messungen des Herrn Neuhaus stets so gewählt werden, dass die Eigenwelle dieses Kreises ohne Barretter erheblich grösser ist als die der zu untersuchenden Schwingung.

Somit ist das System und die Abstimmung desselben in allen Einzelheiten auseinander gesetzt. Es folgen nun in dem nächsten Abschnitt die Untersuchungen, die über dasselbe angestellt worden sind.

§ 2.

Die Untersuchung der Antennen.

Es handelte sich zunächst darum, das gesamte Empfangssystem so einzurichten, dass damit die günstigste Wirkung erzielt werden konnte. Die erste Frage war die Beschaffenheit der Antennen. War die anfängliche Gestalt und Höhe der Antennen die günstigste?

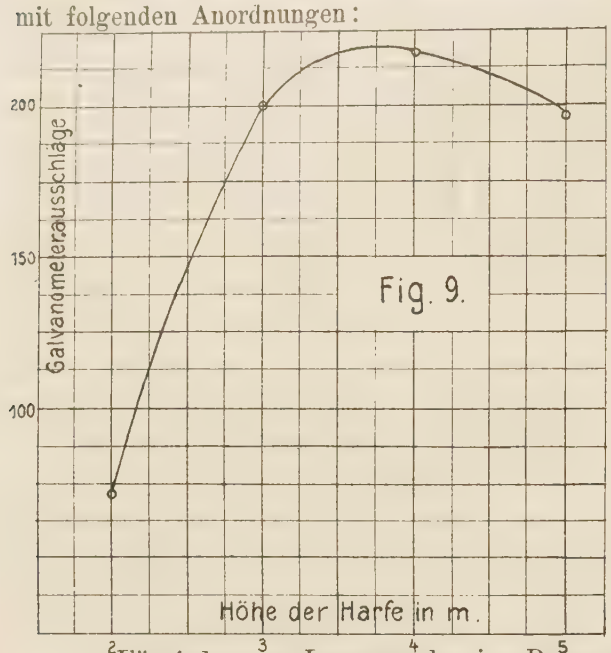
Diese Frage wurde zunächst für die Horizontalharfe geklärt. Es sollte untersucht werden, in welcher Höhenlage dieser Harfe über dem Erdboden die beste Wirkung im Empfänger erzielt werden konnte. Zu diesem Zwecke wurde die Höhe der Antenne systematisch geändert. Die zuerst untersuchte Lage war:

$$a = 5 \text{ m}; \; b = 4{,}50 \text{ m}; \; c = 6{,}5 \text{ m}.$$

(Siehe Fig. 1.) Mittels des gekoppelten Systems wurde eine Resonanzkurve für die kurze Welle des Senders aufgenommen,[1]) um die Wirkung im Thermoindikator zu ermitteln. Die ganze Harfe wurde dann um 1 m gesenkt, dann nochmals um je 1 m, bis die Höhe bei a 2 m betrug. Für jede Lage wurde eine Resonanzkurve aufgenommen. Die Resultate dieser Untersuchung sind in Fig. 9 graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Höhen der Horizontalharfe bei a, als Ordinaten die entsprechenden Ausschläge des Galvanometers aufgetragen. Es zeigt sich, dass in einer bestimmten Höhe der Antenne

1) Durch die Koppelung der Sendeantenne an den Flaschenkreis entstehen zwei Wellen im Sendesystem, von denen hier nur die kurze beobachtet wurde.

die Wirkung im Empfänger die günstigste ist. Der Versuch wurde wiederholt, um auch gleichzeitig das Verhalten der Dämpfung beim Senken der Harfe zu beobachten. Es wurden sechs Versuche ausgeführt mit folgenden Anordnungen:



1. Die Höhe der Horizontalharfe betrug:
   $a = 4$ m; $b = 3{,}50$ m; $c = 5{,}50$ m.
2. Die ganze Harfe wurde um 2 m gesenkt, aber nicht straff gespannt, sodass der Abstand der Antenne in der Mitte vom Erdboden verhältnismässig kleiner war als sonst. Die Abmessungen waren:
   $a = 2$ m; $b = 1$ m; $c = 3{,}50$ m.
3. Die Harfe wurde bei gleicher Höhe von a und c wie bei 2 straff gespannt, sodass jetzt $b = 1{,}50$ wurde.
4. Die Harfe wurde ganz auf die Erde gelegt.
5. Das System wurde durch den Blitzableiter geerdet, der aus einem verzinkten Eisenseil besteht, das ca. 50 m unter der Erde ausgespannt ist.
6. Die Harfe wurde auf eine Höhe
   $a = 3{,}78$ m; $b = 3{,}28$ m; $c = 5{,}28$ m
   gebracht.

Für jede neue Lage wurde eine Resonanzkurve wieder für die kurze Welle aufgenommen, um die Intensität und die Dämpfung[1]) der ankommenden Schwingung zu messen. Die durch diese Beobachtungen erhaltenen Resultate sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

	Höhe der Horizontalharfe	Dämpfung	Intensität
1.	$a = 4$ m; $b = 3{,}50$ m; $c = 5{,}50$ m	0,093	36,7
2.	$a = 2$ m; $b = 1$ m; $c = 3{,}50$ m	0,097	39,3
3.	$a = 2$ m; $b = 1{,}50$ m; $c = 3{,}50$ m	0,098	41,8
4.	$a = b = c = 0$	0,109	27,3
5.	geerdet durch Blitzableiter	0,121	14,8
6.	$a = 3{,}78$ m; $b = 3{,}28$ m; $c = 5{,}28$ m	0,096	44

Das Ergebnis für die Intensität ist wieder genau das gleiche wie bei der ersten Versuchsreihe. In einer Höhe von 3,80 m hat die Horizontalharfe die für das ganze System günstigste Lage. Diese Erscheinung erklärt sich wohl daraus, dass bei höher gelegener Horizontalantenne die Länge der wirksamen Vertikalharfe verkleinert wird. In Fig. 10 wird die mit 1 bezeichnete Lage deshalb die günstigere sein als die zweite, weil in der Lage 1 die Vertikalantenne um das Stück a länger ist als in der andern Lage. Da aber beim Nähern der Horizontalharfe der Erdoberfläche die Erde schliesslich einen dämpfenden Einfluss auf die Schwingung ausübt, so kann eine günstigste Lage der Horizontalantenne erwartet werden.

Die Tabelle zeigt weiter, dass das Dämpfungsdekrement zunimmt bei der Annäherung an die Erde. Die Werte bei den Versuchen 2 und 3 müssen als identisch angesehen werden, der Unterschied

1) Die Berechnung der Dämpfungswerte geschah mit Hilfe der Decremententafeln nach Herrn Prof. Schmidt Phys. Zeitschrift 9, 13, 1908.

von $\frac{1}{1000}$ in den Dekrementen liegt innerhalb der Fehlergrenzen, mit der die Messungen ausgeführt worden sind. Dagegen zeigt sich bei 1 und 3 bez. 4 ein Unterschied in den Dämpfungen, ebenso wächst die Dämpfung beim 4. Versuch, Den grössten Wert nimmt sie an, wenn das System durch den Blitzableiter geerdet ist. Bei einer Höhe von ca. 2 m beginnt die Erddämpfung sich bemerkbar zu machen.

Mit welcher Genauigkeit die Dämpfungsdekremente aus diesen Versuchen ermittelt worden sind, zeigen folgende Zahlen, welche die aus den Dämpfungskurven für die verschiedenen Ordinaten entnommenen Dämpfungsdekremente darstellen.

1. Versuch.	2. Versuch.
0,092	0,096
0,092	0,096
0,093	0,097
0,094	0,097
0,094	0,098
0,093	0,098
0,092	0,097
Im Mittel: 0,093	Im Mittel: 0,097

3. Versuch.	4. Versuch.
0,099	0,109
0,100	0,112
0,097	0,109
0,097	0,110
0,098	0,108
0,098	0,108
0,099	0,109
Im Mittel: 0,098	Im Mittel: 0,109

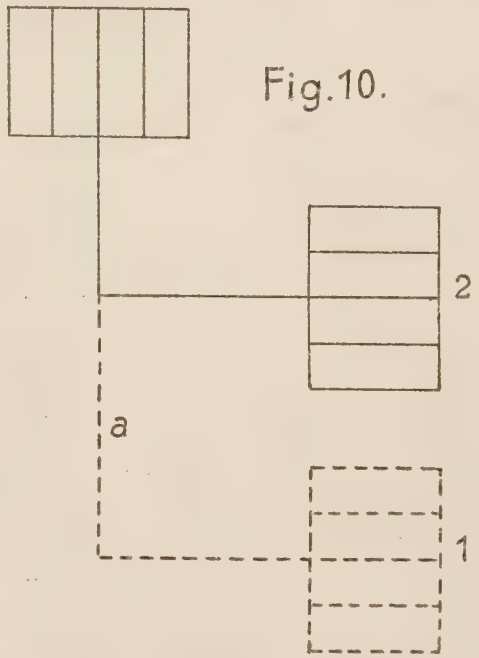


Fig. 10.

Die Abweichung der ermittelten Dämpfungswerte beträgt bei dem 4. Versuch maximal 3 %, bei den andern jedoch weichen die einzelnen Werte nur um 1 % vom Mittelwerte ab.

Das Verhalten der Horizontalharfe war somit geklärt; es war gelungen, eine günstigste Stellung für sie zu bestimmen. Das Bestreben ging nun weiter darauf hinaus, auch die Vertikalharfe so günstig als möglich zu gestalten, ohne an der Konstruktion der Masten etwas zu ändern. Eine Verbesserung konnte erzielt werden

1. durch leichteren Bau der Vertikalharfe, infolgedessen die Harfe so hoch gezogen werden konnte, dass das Querseil, an dem die Harfe aufgehängt war, nahezu horizontal hing. Bei der ersten Harfe war dies nicht möglich, ohne die Gefahr eines Bruches der Masten herbeizuführen. Der Durchhang betrug ca. 1 m, also war auf diese Weise eine Verbesserung der Wirkung im Empfänger um 20 % nach den Messungen des Herrn Prof. Schmidt möglich;[1])
2. dadurch, dass die Aufnahmefläche der Harfe vergrössert wurde. Die Vertikalharfe in ihrer ersten Form nahm eine 10 m breite Fläche ein, während die Spannweite der Masten ca. 28 m beträgt.

Gemäss diesen Umständen wurde die Vertikalharfe jetzt folgendermassen gestaltet. Drei je 25 m lange Phosphorbronzelitzen wurden im Abstande von 7,6 m an dem Querseil aufgehängt, das wieder durch Deltaglocken im Abstande von 1 m von den Masten isoliert war. Die Enden der beiden äusseren Drähte waren $2^1/_2$ m von den Masten entfernt, um die Kapazität der Harfe nicht zu erhöhen. Die oberen Enden der Drähte waren durch eine Bronzelitze mit einander verbunden, die unteren Enden wurden in einem Punkt zusammengeführt, der sich ca. 7 m über der Erdoberfläche befindet. Der mitt-

1) K. E. F. Schmidt, Jahrbuch f. drahtlose Telegraphie und Telephonie 1, 483, 1908.

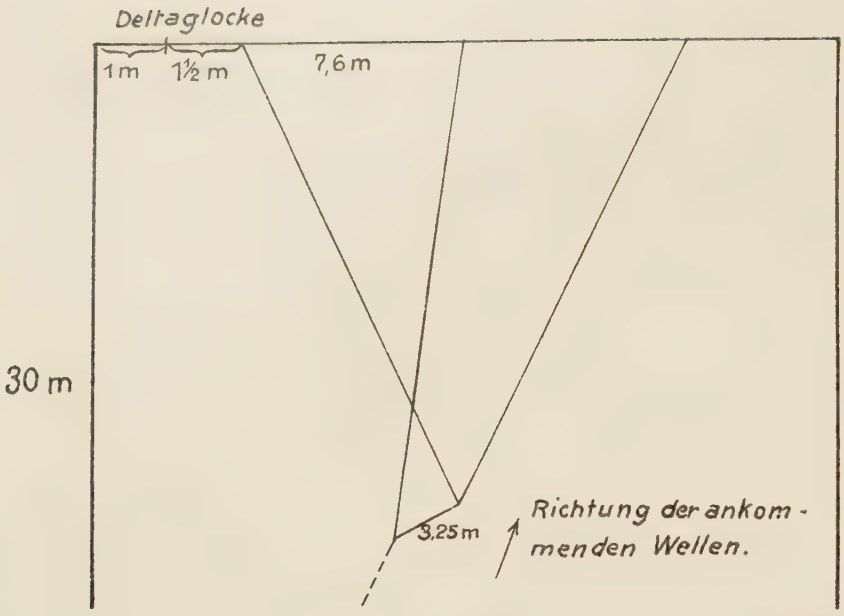


Fig.11.

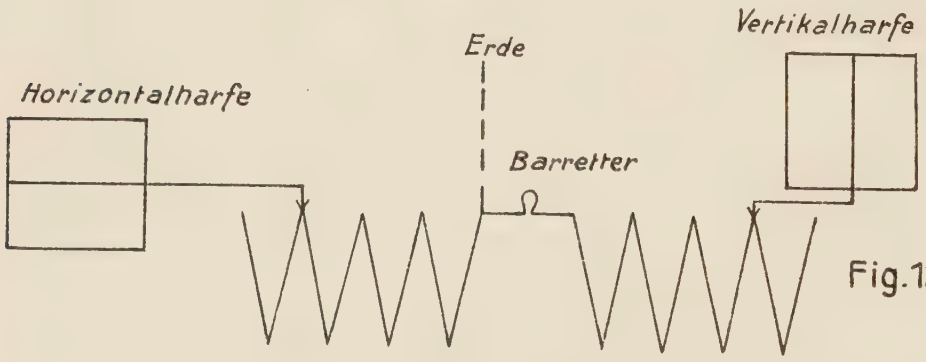


Fig.12.

lere Draht wurde entgegengesetzt der Richtung der ankommenden Wellen abgespannt und zwar so, dass das abgespannte Stück horizontal war, seine Länge betrug 3,25 m.

Um die beiden Vertikalharfen bezüglich ihrer Wirkung vergleichen zu können, wurde für jeden Fall unter genau gleichen Sendebedingungen eine Resonanzkurve aufgenommen. Die Schaltung ist in Fig. 12 wiedergegeben.

Die Schwingung gleitet von der Vertikalharfe über eine Induktionsspule durch den Barretter, dann über eine der ersten gleiche Spule in die Horizontalharfe. Die Aufnahme der Resonanzkurven geschah durch Ändern der Selbstinduktion systematisch zum Barretter, und zwar wurden die Kurven aufgenommen für das System mit Gegenharfe und für das geerdete System für kurze und lange Welle. Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

	Erste Vertikalharfe		Neue Vertikalharfe	
	Gegenharfe	Erde	Gegenharfe	Erde
Kurze Welle 560 m	K. 6,7;[1]) 130 Skt.	K. 7,0; 67 Skt.	K. 7,6; 188 Skt.	K. 8,7; 88 Skt.
Lange Welle 840 m	K. 13,4; 80 Skt.	K. 14,5; 42 Skt.	K. 15,1; 103 Skt.	K. 18,3; 62 Skt.

Der Vergleich der Wirkung der beiden Harfen zeigt eine Vergrösserung der Intensität im Empfänger bei der neuen Harfe. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, liegt das Maximum der Resonanz-

1) Die Zahlen K. 6,7 usw. haben folgende Bedeutung. Die Induktionsspulen sind von drei zu drei Windungen mit Kontakten versehen, um ihre Selbstinduktion ändern zu können. Die Zahlen geben nun an, wieviel Kontakte auf jeder Seite des Barretters abgegriffen werden müssen, um das Maximum der Resonanzkurve zu erreichen, und zwar ist die Induktanz bei K. 7 z. B. grösser als bei K. 6, bei K. 8 grösser als bei K. 7. Die anderen in der Tabelle noch angegebenen Zahlen stellen die aus den Resonanzkurven ermittelten maximalen Galvanometerausschläge dar.

kurven, die mit der neuen Harfe aufgenommen sind, bei einem grösseren L-Werte als vorher bei gleichen Wellen der Sendestation. Daraus folgt also, dass die Kapazität der neuen Vertikalharfe kleiner sein muss als die der ersten.

Die genauen Amplitudenunterschiede und Abweichungen der Kapazität sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

	Amplitudenunterschiede		Verhältnis der Kapazitäten	
	Gegenharfe	Erde	Gegenharfe	Erde
Kurze Welle	42 % mehr	31 % mehr	$\frac{C_2}{C_1} = 0{,}84$	$\frac{C_2}{C_1} = 0{,}72$
Lange Welle	29 % mehr	48 % mehr	$\frac{C_2}{C_1} = 0{,}86$	$\frac{C_2}{C_1} = 0{,}87$

Hierin bedeutet C_2 die Kapazität der neuen Vertikalharfe, vermehrt um diejenige der Gegenharfe; C_1 die Summe der Kapazitäten der alten Vertikal- und Horizontalharfe. Das Verhältnis dieser beiden Kapazitäten ist durchschnittlich 0,82, die Wirkung ist durchschnittlich um 37,5 % erhöht worden.

Das erste System war inbezug auf die Kapazität ausgeglichen, d. h. beide Harfen besassen ungefähr die gleiche Kapazität. Durch die neue Vertikalharfe ist jetzt das System unsymmetrisch geworden in Bezug auf die Kapazität. Um das System wieder auszugleichen, musste die Kapazität der Vertikalharfe noch vergrössert werden. Zu diesem Zweck wurden noch zwei je 25 m lange Bronzelitzen eingefügt zwischen dem mittleren Draht und den beiden äusseren Drähten, sodass der Abstand der oberen Enden ca. 3,8 m betrug. Die drei mittleren Drähte wurden zunächst entgegengesetzt der Richtung der ankommenden Wellen abgespannt, und zwar war der mittlere Draht ca. 3,25 m, die beiden anderen ca. 2,5 m abgespannt.

Mit diesem System wurde eine Resonanzkurve aufgenommen. Es zeigte sich, dass durch die Vermehrung um 2 Drähte die Empfangswirkung nicht mehr gestiegen war, dagegen stimmte jetzt die Kapazität der Vertikalharfe mit der früheren fast genau überein, denn das Maximum der Resonanzkurve wurde bei demselben L-Wert wie früher erreicht. Dieses Maximum lag vorher bei K. 6,7 für die kurze Welle (siehe Tabelle S. 16), jetzt wurde das Maximum bei K. 6,6 erreicht für dieselbe Welle. Ebenso genau stimmen die übrigen Kurven überein.

Es handelte sich nun noch darum, zu untersuchen, ob die oben angegebene Abspannung der drei mittleren Drähte die günstigste war. Es wurden folgende Versuchsanordnungen getroffen:

1. Die fünf Drähte wurden senkrecht zu einem Punkt heruntergeführt, sodass die Drähte sämtlich in einer Ebene lagen und verschieden lang waren. (Fig. 13.)
2. Die mittleren Drähte wurden mit ihrem unteren Ende nach hinten (der Sendestation abgewandt) abgespannt.
3. Die mittleren Drähte wurden nach vorn und die beiden äusseren Drähte ungefähr in halber Höhe nach den Seiten hin abgespannt. (Fig. 14. Es ist hier nur der mittelste Draht gezeichnet.)

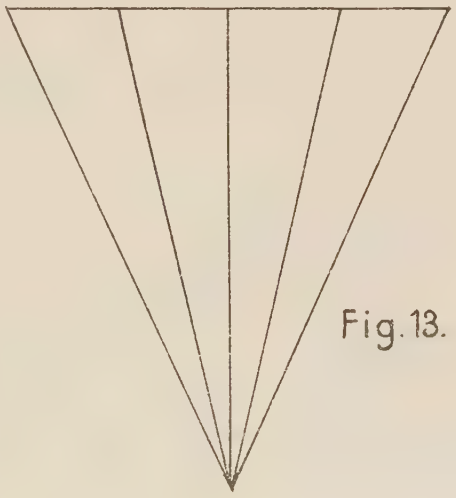


Fig. 13.

Für jeden Fall wurde eine Resonanzkurve für die kurze und lange Welle aufgenommen mit Gegenharfe. Aus ihnen wurden die Resultate entnommen, die in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt sind.

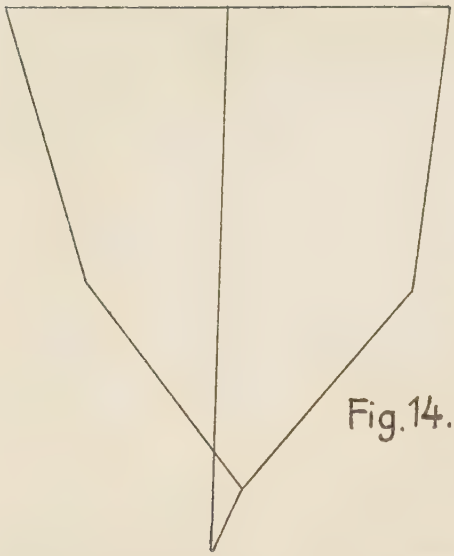


Fig. 14.

Abspannung	Kurze Welle 560 m		Lange Welle 840 m	
Alle Drähte in der Vertikalebene	K. 7,05	201 Skt.	K. 13,8	124 Skt.
Die mittleren Drähte nach hinten gespannt	K. 6,6	215 Skt.	K. 13,4	124 Skt.
Die mittleren Drähte nach vorn gespannt	K. 6,6	240 Skt.	K. 13,4	126 Skt.
Die äusseren Drähte nach der Seite abgespannt	K. 6,6	240 Skt.	K. 13,4	126 Skt.

Der erste Fall ist der ungünstigste, die Intensität ist im Vergleich zu den anderen Fällen geringer; auch ist hier die Kapazität der Vertikalharfe wieder zu klein. Sind die drei mittleren Drähte in der Richtung der Senderwellen abgespannt, so wird die Wirkung schon besser, sie steigt aber noch mehr, wenn die mittleren Drähte nach vorn, nach der Sendestation zu, abgespannt sind. Der vierte Versuch ergab keine Verbesserung der Empfangswirkung mehr.

Die hier gewonnenen Resultate stimmen zum Teil überein mit denen, die Zenneck gefunden hat.[1] Zenneck findet, dass eine entgegengesetzt der Richtung der aufgenommenen Wellen geneigte Harfe eine um 18 % günstigere Wirkung ergibt als eine vertikal hängende Antenne. Aus den obigen Versuchen ergibt sich für diesen Fall eine Verbesserung von 20 %. Abweichend von den Resultaten von Zenneck wurde hier gefunden, dass die Vertikallage der Antenne die ungünstigste ist.

§ 3.

Untersuchung des doppelt induktiv gekoppelten Empfangssystems.

Orientierende Messungen der Empfangswirkung bei grösseren Entfernungen der Sende- und Empfangsstation mittels eines doppelt induktiv gekoppelten Empfangssystems sind zum ersten Mal von Herrn Prof. Schmidt in der Empfangsstation Wallwitz durchgeführt, und die prinzipiellen Gesichtspunkte, die bei der Erzielung einwandfreier Resultate beachtet werden müssen, sind von ihm kurz dargelegt worden.[2]

Die Aufgabe der folgenden Untersuchungen bestand nun darin, durch systematisch durchgeführte Messungen die Fehlerquellen zu ermitteln, und die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der erhaltenen Messresultate exakt festzulegen.

Vor allen Dingen war es von grösster Wichtigkeit für die Messungen mit einem derartigen Empfangssystem, den Einfluss der beiden Kopplungen in Bezug auf die Intensität und Dämpfung genau zu studieren.

Zunächst wurde die Kopplung I/II des Messkreises an den Antennenkreis untersucht. Diese Kopplung wurde verhältnismässig fest gemacht. Der Abstand der Spule Ib des Antennenkreises von der Spule IIa des Messkreises betrug dabei 12 cm; die Spulen IIIa und IIb hatten einen Abstand von

1) Zenneck, Annalen d. Physik, 1907, 23, S. 860.
2) K. E. F. Schmidt, Annalen der Physik, 1908, 26, S. 622.

10 cm, der während der ganzen Untersuchung umgeändert blieb. Mit diesen Kopplungsverhältnissen wurde mittels des Drehkondensators eine Resonanzkurve aufgenommen, um daraus die Intensität und Dämpfung der Schwingung zu messen.

Nun wurde die Kopplung I/II loser gemacht durch Vergrösserung des Abstandes Ib-IIa. Für jede Kopplung wurde wieder eine Resonanzkurve aufgenommen. Diese Untersuchung wurde durchgeführt für die kurze und lange Welle. In Fig. 15 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Entfernungen der Spulen Ib und IIa abgetragen in cm, als Ordinaten die aus den Resonanzkurven entnommenen maximalen Galvanometerausschläge in Skalenteilen und dann die aus den Kurven berechneten Dämpfungsdekremente.

Wie die Kurve für die Amplitude zeigt, hat die Intensität der Schwingung bei einer bestimmten Kopplung einen grössten Wert. Sie hat bei der engen Kopplung einen kleinen Betrag, steigt bei weiter werdender Kopplung bis zu einem maximalen Werte, um dann bei noch weiter werdender Kopplung wieder abzunehmen. Dieses Verhalten der Intensität des zweiten Kreises erklärt sich durch die Rückwirkung, bez. Energieentziehung, auf den Antennenkreis. Je stärker diese Rückwirkung ist, umso mehr wird die Intensität im offenen Kreise heruntergedrückt. Nach Überschreitung des Optimums sinkt die Intensität infolge der abnehmenden Wirkung mit weiter werdender Kopplung.

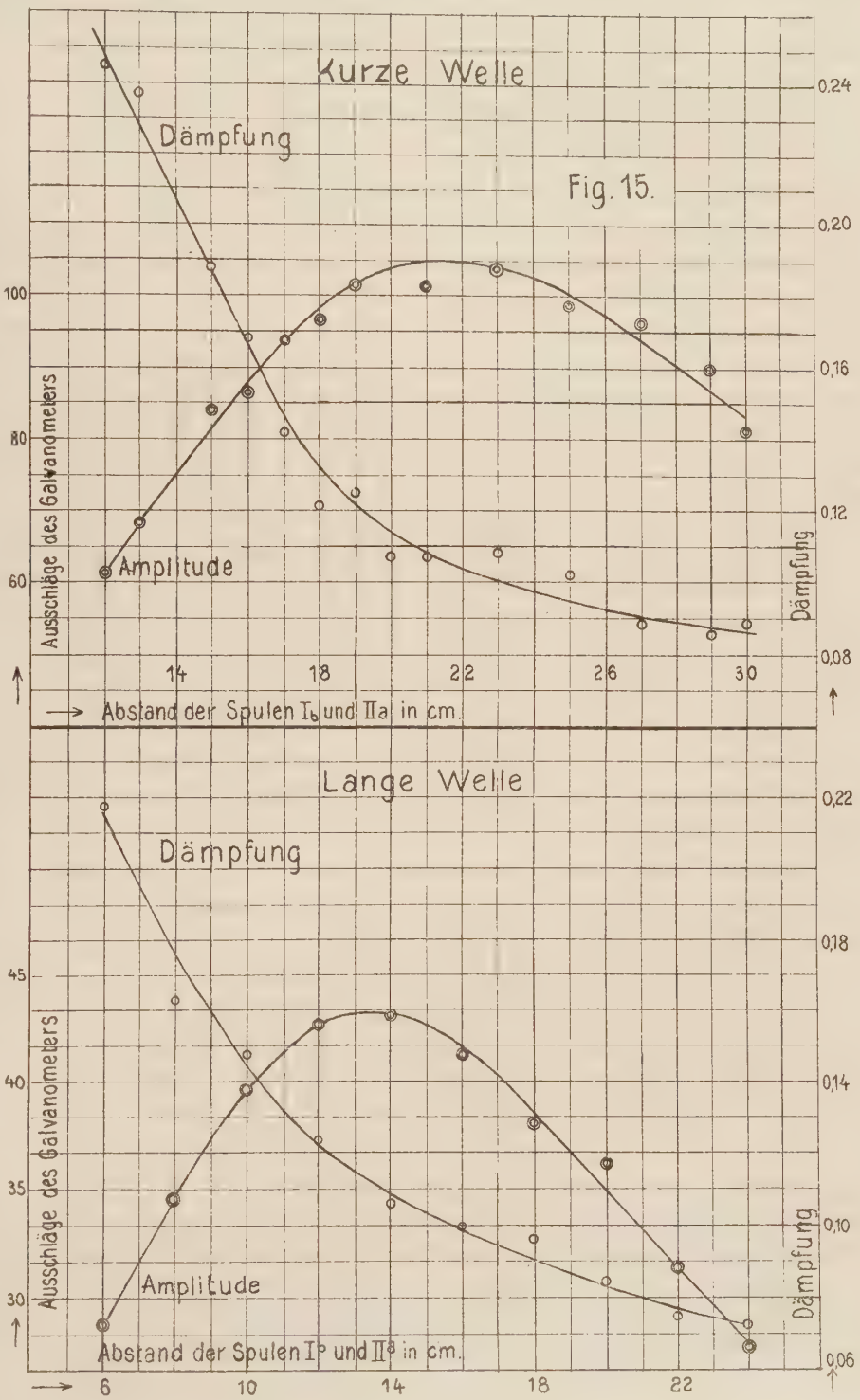


Fig. 15.

Einen bemerkenswerten Verlauf nimmt auch die Kurve für die Dämpfungsdekremente. Diese Kurve fällt mit weiter werdender Kopplung zunächst steil ab, die Dämpfung verkleinert sich also sehr stark. An der Stelle, wo die Wirkung im Barretter ihren Höhepunkt erreicht, flacht sich die Dämpfungskurve ab. Dieses Verhalten hängt gleichfalls mit der Rückwirkung des Messkreises auf den Antennenkreis zusammen. Die Rückwirkung erhöht die Dämpfung beträchtlich, besonders bei enger Kopplung, da dann dem ersten Kreis sehr viel Energie entzogen wird. Wird die Kopplung der beiden Kreise aber weiter, so wird die Energieentziehung merklich geringer, und daher wird auch die Kurve für die Dämpfung mit zunehmendem Spulenabstand flacher.

Die kurze und lange Welle zeigen in ihrem Verhalten in Bezug auf die Intensität und Dämpfung genau denselben Verlauf. Nur sind die Entfernungen, bei denen das Optimum der Intensität auftritt, gänzlich verschieden von einander, die kurze Welle hat die günstigste Kopplung, wenn der Abstand der Spulen Ib und IIa 22 cm beträgt; für die lange Welle ergibt sich die beste Stellung schon bei einem Abstande von 13 cm.

Diese Untersuchung wurde öfter wiederholt und zeitigte qualitativ stets analoge Resultate. Nur war die Lage des Optimums stets verschieden. Dieser Umstand, dass das Optimum der Kopplung I/II immer einen verschiedenen Wert hatte, hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Einmal spielt dabei die Entfernung der Spulen Ia und Ib des offenen Kreises eine Rolle. Man kann den Antennenkreis auf ein und dieselbe Welle so abstimmen, dass die Entfernung der Spulen Ia und Ib verschieden ist. (Siehe S. 11 oben.) Stehen diese Spulen dicht zusammen, so wird auf den Messkreis mehr Energie übertragen als in dem Falle, wo Ia und Ib weiter von einander entfernt sind. Im ersten Falle ist die Rückwirkung daher auch grösser als in dem andern, das Optimum wird also dann bei weiterer Kopplung erreicht als beim zweiten Fall. Es seien für diese Tatsache einige Zahlenbeispiele angegeben.

Abstand Ia/Ib	Optimum der Kopplung I/II	Kondensatorstellung
2,5 cm	21 cm	64,9
6,2 cm	19,8 cm	64,9
15 cm	16,5 cm	64,9

Bei einer anderen Versuchsreihe ergab sich:

Abstand Ia/Ib	Optimum der Kopplung I/II	Kondensatorstellung
1 cm	20 cm	50,3
10,3 cm	17,2 cm	50,3
23,5 cm	13,5 cm	50,7

Als Beweis für die Richtigkeit der Abstimmungen des Antennenkreises sind noch die Stellungen des Drehkondensators im Messkreise angegeben, bei denen das Maximum der Resonanzkurven erreicht wurde.

Bei den in Fig. 15 dargestellten Kurven für kurze und lange Welle sind die Unterschiede aus dem eben angegebenen Grunde nicht zu erklären; denn bei der kurzen Welle betrug der Abstand Ia/Ib 8,4 cm, für die lange Welle war Ia/Ib = 8,1 cm, also nahezu gleiche Entfernungen. Hier findet man die Erklärung in folgendem. Der Kopplungskoeffizient ist:

$$k^2 = \frac{L_{12}^{\,2}}{L_{11} \cdot L_{22}}$$

L_{22} bleibt als Selbstinduktionskoeffizient der Spule IIa ungeändert, nur L_{12} und L_{11} ändern sich. Bei der langen Welle wird nun bedeutend mehr Induktanz in den Antennenkreis eingeschaltet als bei der kurzen, es wird also L_{11} vergrössert. Damit k^2 den gleichen Wert beibehält, muss L_{12} vergrössert werden, d. h. die Spulen Ib und IIa müssen einander genähert werden.

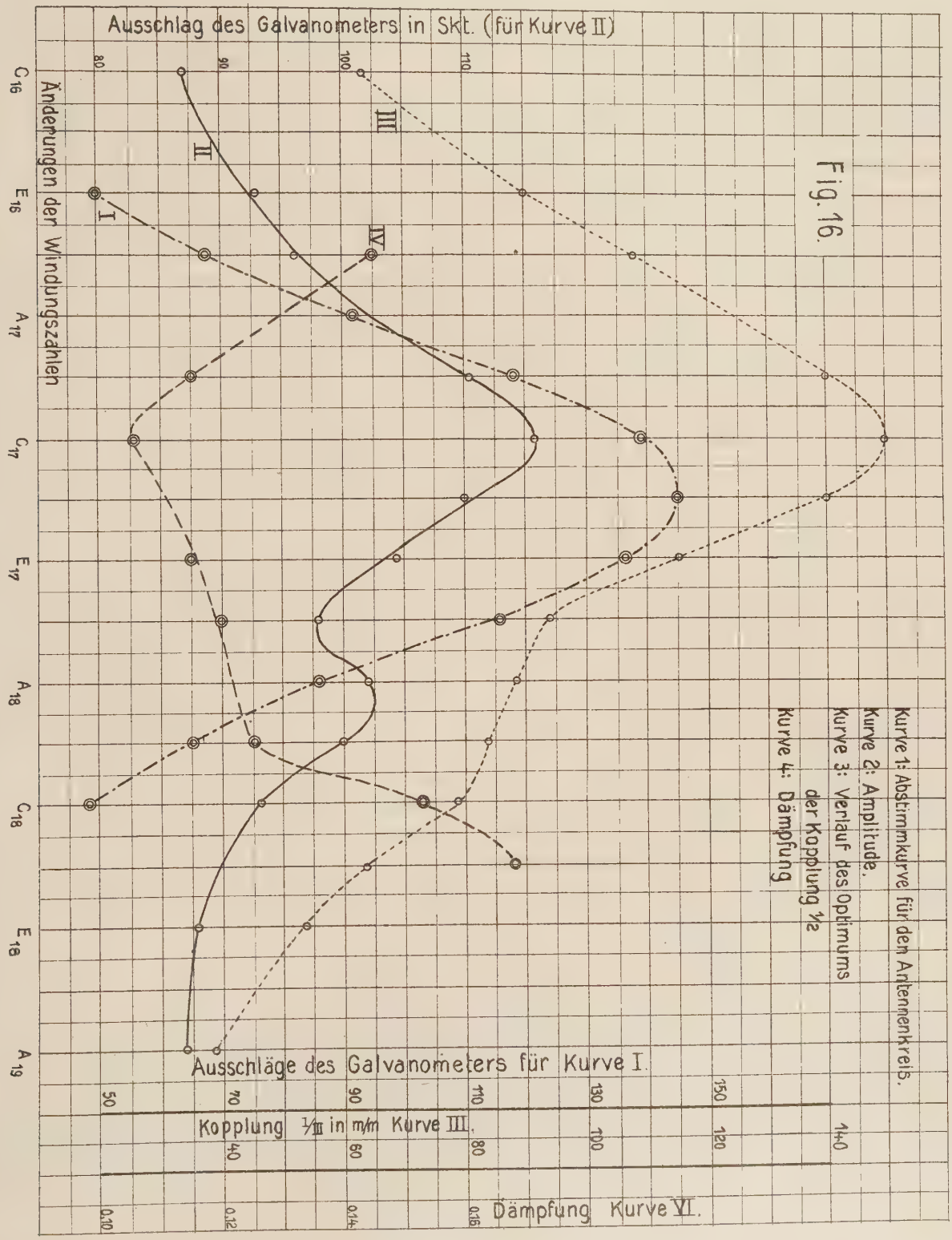


Fig. 16.

Weiter hängt das Optimum der Kopplung I/II noch ab von der Abstimmung des Antennenkreises. Ist nämlich der Antennenkreis gegen die Welle der Sendestation verstimmt, so hat er weniger Energie als im Falle der Resonanz, das Optimum der Kopplung des Messkreises an den Antennenkreis wird dann bei kleinerem Abstande der Spulen Ib und IIa erreicht. Diese Abhängigkeit des Kopplungsmaximums von der Abstimmung des Antennenkreises ist genau untersucht worden. Der offene Kreis wurde durch Aufnahme einer Resonanzkurve scharf abgestimmt. (Siehe Fig. 8, S. 13.) Das Maximum lag scharf bei D_{17}, sodass von den Spulen a und b je $17^3/_6$ Windungen eingeschaltet waren. Nun wurde der Messkreis angekoppelt, das Optimum der Kopplung I/II genau bestimmt und unter diesen Verhältnissen dann eine Resonanzkurve mit dem Drehkondensator aufgenommen. Es wurde nun von den Spulen a und b je ein Sechstel einer Windung herausgenommen, der Antennenkreis also gegen die Welle der Sendestation verstimmt. Es wurde der Messkreis wieder angekoppelt und wieder das Optimum I/II bestimmt. Diese Verstimmung wurde systematisch fortgesetzt, bis schliesslich von a und b je $1^1/_6$ Windung herausgenommen war. Ganz analog wurde dann der Antennenkreis verstimmt durch Zufügen bis zu je $1^1/_2$ Windung von a und b. Es war also im ganzen ein Intervall von $2^4/_6$ Windungen untersucht worden, wodurch eine Änderung der Wellenlänge um ca. 70 m verursacht wurde. In Fig. 16 sind die Resultate dieser Untersuchung graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die in den Antennenkreis eingeschalteten Windungen abgetragen, als Ordinaten der Abstand der Spulen Ib und IIa in mm im Falle der günstigsten Kopplung; die maximalen Galvanometerausschläge bei den Resonanzkurven des gekoppelten Systems; die aus diesen Kurven ermittelten Dämpfungsdekremente. Als Vergleich ist noch die Abstimmungskurve des Antennenkreises eingezeichnet. Die Kurven für die Intensität (II) und für das Kopplungsoptimum (III) zeigen einen Sattel, der besonders in der Kurve II sehr deutlich ausgeprägt ist. Die Dämpfung zeigt einen entsprechenden Verlauf. Man ersieht aus der Kurve, dass in dem Punkte der scharfen Abstimmung des Antennenkreises die Intensität nicht die grösste ist, sondern die Intensität und damit die günstigste Kopplung I/II erreicht schon vorher einen maximalen Wert. Die Dämpfung zeigt bei der weitesten Kopplung ein Minimum, wird mit stärker werdender Kopplung grösser.

Von der Kopplung II/III des Barretterkreises an den Messkreis ist das Optimum der Kopplung I/II gänzlich unabhängig. Auch wenn im Messkreis durch Zuschalten von Widerstand oder Induktanz die Intensität herabgedrückt wird, ändert das Maximum seine Lage nicht. Selbst als die Amplitude im zweiten Kreise um 50 % verringert wurde, war keine Änderung des Kopplungsoptimums I/II zu konstatieren.

Nachdem so das Verhalten der Kopplung des Messkreises an den Antennenkreis in allen Einzelheiten studiert worden war, musste auch die Wirkung der Kopplung des Barretterkreises an den zweiten Kreis untersucht werden.

Ganz analog wie vorher bei der Untersuchung der Kopplung I/II wurde auch jetzt der Abstand der Spulen IIIa und IIb (siehe Fig. 2) um bestimmte Intervalle geändert. Dabei war die Kopplung I/II so gewählt, dass sie die günstigste inbezug auf die Intensität des Messkreises war. Für jede Stellung wurde eine Resonanzkurve aufgenommen zur Bestimmung der Intensität und Dämpfung. Die Untersuchung wurde wieder durchgeführt für die kurze und lange Welle des Senders und zwar war für die kurze Welle:

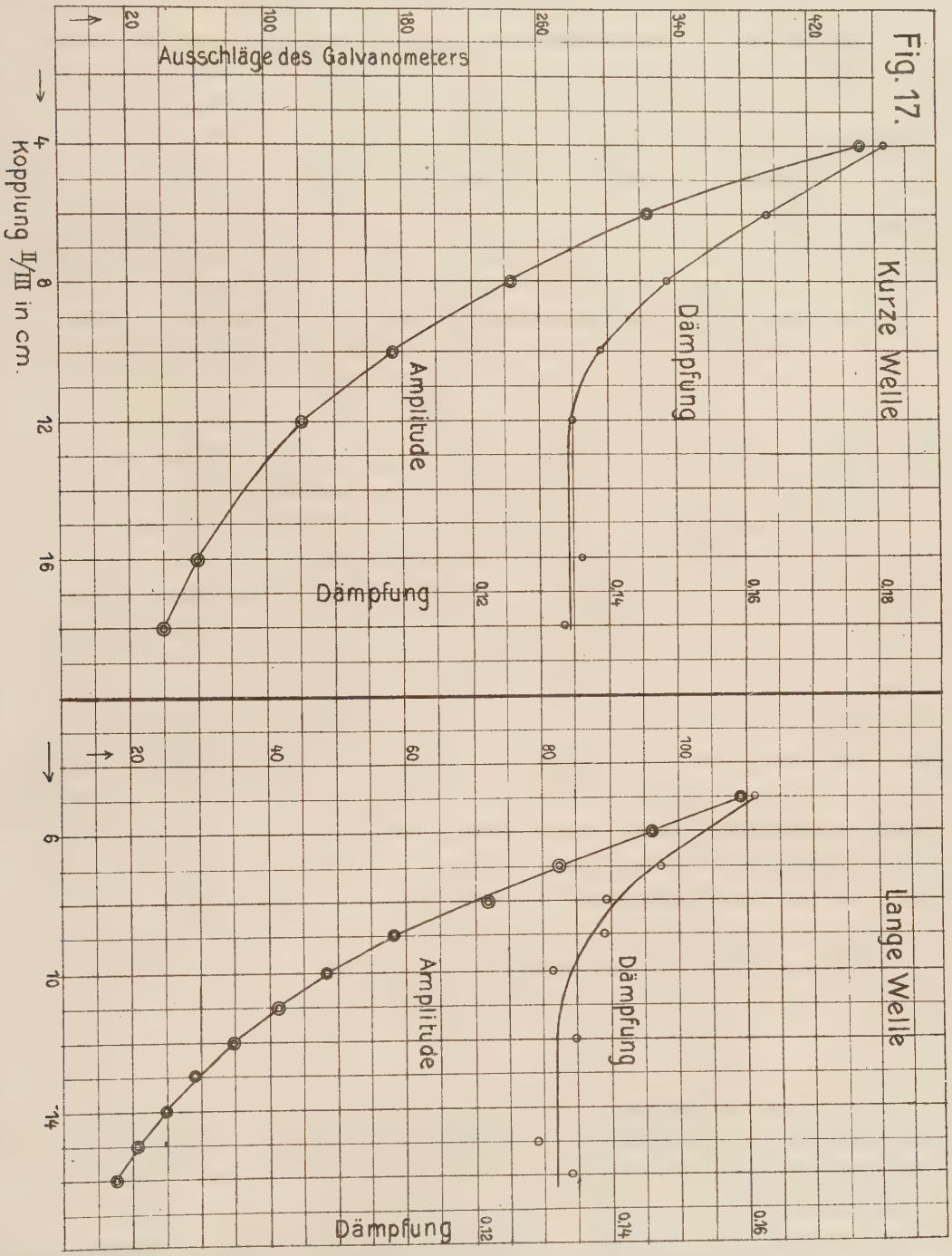
die Kopplung I/II = 13,7 cm; der Abstand Ia/Ib = 7,9 cm;

für die lange Welle:

die Kopplung I/II = 11,8 cm; der Abstand Ia/Ib = 5,4 cm.

Die Kurven der Fig. 17 stellen die gewonnenen Resultate dieser Untersuchung dar. Als Abszissen sind die Abstände der Spulen IIb und IIIa abgetragen, als Ordinaten die aus den entsprechenden Resonanzkurven entnommenen maximalen Galvanometerausschläge und die zugehörigen Dämpfungsdekremente. Bei dieser Kopplung zeigt die Amplitudenkurve ein glattes Abfallen, die Dämpfungskurve fällt mit weiter werdender Kopplung zunächst ab, wird dann aber der Abszissenachse parallel. Diese Kopplung verhält sich also ganz anders als die Kopplung des ersten und zweiten Kreises. Das kommt eben

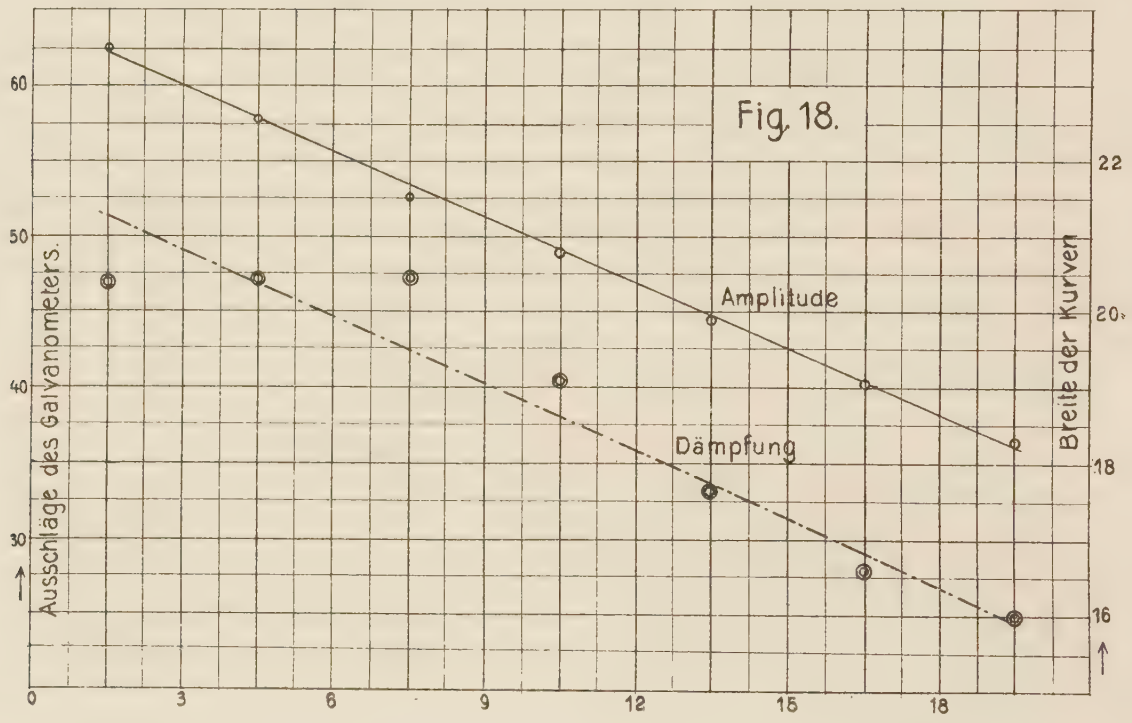
daher, dass die Energie in dem Barretterkreise sehr klein ist; denn einmal ist er durch den Barretter sehr stark gedämpft, dann sind ausserdem die Schwingungszahlen beider Kreise ausserordentlich verschieden von einander. Der anfängliche Abfall, den die Kurve für die Dämpfung zeigt, rührt wohl daher, dass dem Messkreise bei enger Kopplung merkliche Energie durch den Barretterkreis entzogen wird.



Die Resultate stimmen für die kurze und lange Welle vollkommen überein. Wenn die beiden Kopplungsspulen ungefähr 10 cm von einander entfernt sind, wird die Dämpfung konstant und ändert sich mit weiter werdender Kopplung nicht mehr.

Damit sind die beiden Kopplungen des Empfangssystemes in ihrem Verhalten inbezug auf Intensität und Dämpfung genau festgelegt. Man ist jetzt imstande, mit diesem System exakte und vergleichbare Messungen auszuführen.

Es folgt nun eine Untersuchung über den Einfluss der Induktanz des Messkreises auf die Dämpfung und Intensität. Es war beobachtet worden, dass das Zuschalten von toter Induktanz in den Messkreis die Intensität bedeutend schwächt und die Dämpfung herabsetzt. Es schien nun interessant, diese Erscheinung genauer zu verfolgen. Es wurde in den Messkreis zu diesem Zwecke eine Induktionsspule eingeschaltet, die den Spulen a und b des Antennenkreises analog gebaut war. Es wurden zunächst 18 Windungen dieser Spule abgegriffen und mittels des Drehkondensators wurde eine Resonanzkurve aufgenommen. Dann wurde die Windungszahl auf 15 herabgesetzt und wieder eine Kurve aufgenommen u. s. f. Um einen Schluss auf die Dämpfung machen zu können, wurden die Maximalausschläge aller Kurven gleich 100 gesetzt und die anderen Punkte darauf reduziert. Die Breiten der Kurven waren dann ein Mass für die Dämpfung. Es stellte sich heraus, dass die Intensität und Dämpfung linear von der eingeschalteten toten Induktanz abhängen. In Fig. 18 sind diese Beziehungen graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die eingeschalteten Windungen der Induktionsspule abgetragen, als Ordinaten die Breiten der Kurven und die aus den Kurven ermittelten maximalen Galvanometerausschläge.



Als Abschluss dieses Teiles folgen einige Zahlenbeispiele, die darlegen sollen, mit welcher Genauigkeit und Sicherheit die Intensität und Dämpfung der gemessenen Schwingung aus den aufgenommenen Resonanzkurven ermittelt werden können.

Es wurden bei konstant bleibender Sendeenergie in der Empfangsstation in Intervallen von ca. $^1/_2$ Stunde Resonanzkurven aufgenommen. Zwischen jedem Versuch wurde in der Sendestation unterbrochen, da nach den Messungen des Herrn Kaiser Schwankungen der Sendeenergie auftraten, wenn der Funke länger als ca. $^1/_2$ Stunde übergegangen war. Die folgenden Tabellen geben die Messresultate an.

I.

Intensität	Dämpfung
60	—
61	0,151
61,5	0,147
61,5	0,149
61,5	0,150

II.

Intensität in der Sende-antenne	Intensität d. Empfangs-antenne	Dämpfung
97,6	77,5	0,126
99	81,5	0,127
91,2	74,5	0,128
139	89	0,130
134	87	0,127

III.

Sende-energie	Intensität in d. E. St.	Dämpfung
108	150	0,075
107	149	0,077
108	150	—
105	150	0,075
104	150	—
91	136	0,073
—	136	0,074
93	140	0,077
—	140	0,074
91	138	0,076
	141	0,075

IV.

Intensität	Dämpfung
73,8	0,145
76,5	0,149
71	0,140
76	0,142
74,6	0,157
78	0,150
76	0,150

Der mittlere Wert der Dämpfung ist 0,149. Die grösste Abweichung von diesem Werte beträgt 1,34 %.

Die Intensität ist konstant.

In der Tabelle II weicht die Intensität im Empfänger um ca. 8,5 % vom Mittelwerte 81,9 ab infolge der Schwankungen der Sendeenergie. Es sind die entsprechenden Werte der Sendeantenne beigefügt, die mir von Herrn Kaiser freundlichst zur Verfügung gestellt worden sind. Trotz der grossen Schwankungen blieb die Dämpfung nahezu konstant. Sie weicht maximal nur 1,5 % vom Mittelwerte 0,128 ab.

In der Tabelle III sind die Resultate einer Beobachtung vom 1. Februar 1909 zusammengestellt. Nach der Aufnahme der fünften Kurve sank die Intensität plötzlich um ca. 8 % infolge Nachlassens der Sendeenergie, wie die wieder beigefügten Zahlen der Sendestation beweisen. Nach der fünften Kurve zeigten sich dann nur noch Schwankungen von ca. 1 % vom Mittelwert 138,5.

Die Dämpfung weicht gegen den Mittelwert 0,075 um ca. 2,7 % ab.

Aus diesen Resultaten folgt, dass die Dämpfung der elektrischen Wellen mit einer Genauigkeit von ca. 2 % aus den aufgenommenen Resonanzkurven ermittelt werden kann. Die Intensität schwankt an gewissen Tagen ziemlich stark, doch ist sie in den meisten Fällen mit einer Genauigkeit von ca. 1 % zu bestimmen. Es mag noch bemerkt werden, dass die in den Tabellen I und II angegebenen Resultate von verschiedenen Beobachtern gewonnen sind.

Die in den obigen Tabellen angegebenen Resultate weisen eine gute Konstanz auf. Es kommen aber auch Tage vor, wo die Dämpfungswerte beträchtlich von einander abweichen, wie Tabelle IV angibt. Hier weicht die Intensität um ca. 5,3 % vom Mittelwert ab. Die Dämpfung zeigt Schwankungen von ca. 4,5 % vom Mittelwert 0,148.

Diese Schwankungen sind wahrscheinlich auf den Einfluss der Atmosphäre zurückzuführen.

Es seien nun noch einige Zahlenbeispiele angegeben, die zeigen sollen, wie exakt die Dämpfungswerte bei den einzelnen Ordinaten der Dämpfungskurven übereinstimmen.

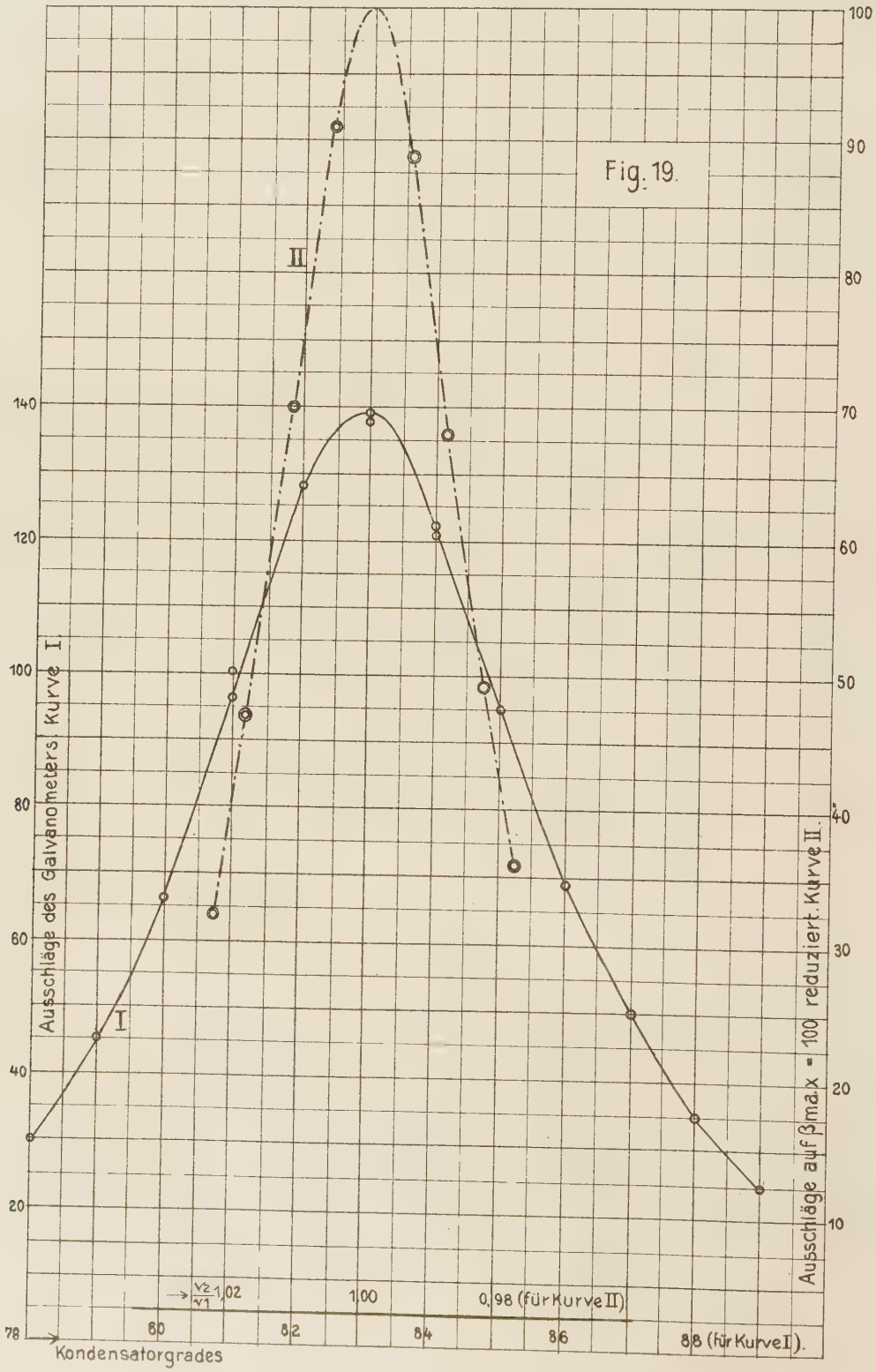
Aus Tab. I.	Aus Tab. II.	Aus Tab. III.
0,151	0,127	0,076
0,151	0,128	0,074
0,151	0,128	0,076
0,149	0,125	0,073
0,151	0,127	0,076
0,147	0,127	0,076
Mittel: 0,150	Mittel: 0,127	Mittel: 0,075

Aus Tab. IV.

0,150	0,150	0,157	0,157	0,142	0,141
0,150	0,150	0,157	0,157	0,142	0,144
0,160	0,150	0,157	0,155	0,143	0,142
Mittel: 0,150		Mittel: 0,157		Mittel: 0,142	

Grössere Abweichungen als $\frac{3}{1000}$ vom Mittelwert kommen sehr selten vor. Durchschnittlich schwanken die einzelnen Werte nur um $\frac{2}{1000}$.

In Fig. 19 ist eine Resonanzkurve der Empfangsstation wiedergegeben, darüber ist die zugehörige Dämpfungskurve gezeichnet.



Teil II.

Untersuchungen über die Abhängigkeit der Strahlung von der Kopplung des Induktors.

Im Anfange des Jahres 1908 war die physikalische Versuchsstation Halle-Cröllwitz mit einem neuen Maschinenaggregat ausgerüstet worden, um mit grösseren Energiemengen arbeiten zu können. Es zeigte sich aber bei der Beobachtung in der Empfangsstation, dass trotz der grossen, in die Maschine geschickten Energie die Empfangswirkung erheblich unter der erwarteten zurückblieb. Der Grund dieser Erscheinung wurde darin gefunden, dass die Kopplung des Resonanzinduktors an den Maschinenkreis nicht die günstigste war.

Die folgenden Untersuchungen sollten nun über diese Frage Aufschluss geben. Der hierbei benutzte Induktor wurde mit Wechselstrom gespeist. Seine Primärspule hat eine Selbstinduktion von $L_1 = 966400$ cm bei einer Windungszahl von 165 und einem Widerstande von 0,03 Ohm. Die Sekundärspule hat eine Selbstinduktion von $700 \cdot 10^9$ cm bei einem Widerstande von 4660 Ohm. Der gegenseitige Induktionskoeffizient der beiden Wicklungen beträgt $2{,}6 \cdot 10^9$ cm.

Orientierende Messungen ergaben, dass die Kopplung des Induktors zu fest war, und dass mit weiter werdender Kopplung die Energie in der Sendeantenne bedeutend zunahm und damit auch die Strahlung. Um die Kopplung variieren zu können, wurde in den primären Induktorkreis eine Drosselspule eingeschaltet, deren Induktanz durch Änderung der Windungszahl oder Einschieben eines 47 cm langen Eisenkernes geändert werden konnte. Ihre Windungszahl ist 920 (10 Lagen mit je 92 Windungen, die einzeln in den Kreis eingeschaltet werden können). Die Induktanz der Spule wurde genau bestimmt.[1]) In Fig. 20 sind die erhaltenen Werte graphisch aufgetragen, als Abszissen die Längen des in der Spule sich befindenden Eisenkernes in cm, als Ordinaten die Induktanz.

Fig. 21 stellt die Schaltung des Sendesystems dar.[2])

Der Kopplungskoeffizient bestimmt sich aus

$$k^2 = \frac{L_{12}^{\,2}}{L_{22} \cdot \Sigma L}$$

worin L_{12} den gegenseitigen Induktionskoeffizienten der Sekundär- und Primärspule, L_{22} die Selbstinduktion der Sekundärwicklung bedeutet, und ΣL sich zusammensetzt aus der Induktanz der eingeschalteten Drosselspule, der des Ankers der Wechselstrommaschine und derjenigen der Primärwicklung des Induktors. Geändert wurde nur die Induktanz der Drosselspule. Während der ganzen Untersuchung wurde die Stromstärke im primären Induktorkreise konstant gehalten. Die Versuche wurden für zwei verschiedene Kapazitäten durchgeführt. Zunächst wurden vier Leydener Flaschen benutzt, die symetrisch

1) Die Bestimmung der Induktanz geschah mit der Wechselstrommaschine durch Beobachtung von Spannung, Stromstärke und Frequenz.

2) Betreffs der genauen Beschreibung des Sendesystems, insbesondere der Messmethoden, muss ich auf die Dissertation von Herrn Kaiser verweisen: „Beiträge zur Kenntnis der gekoppelten elektrischen Systeme". Halle 1909.

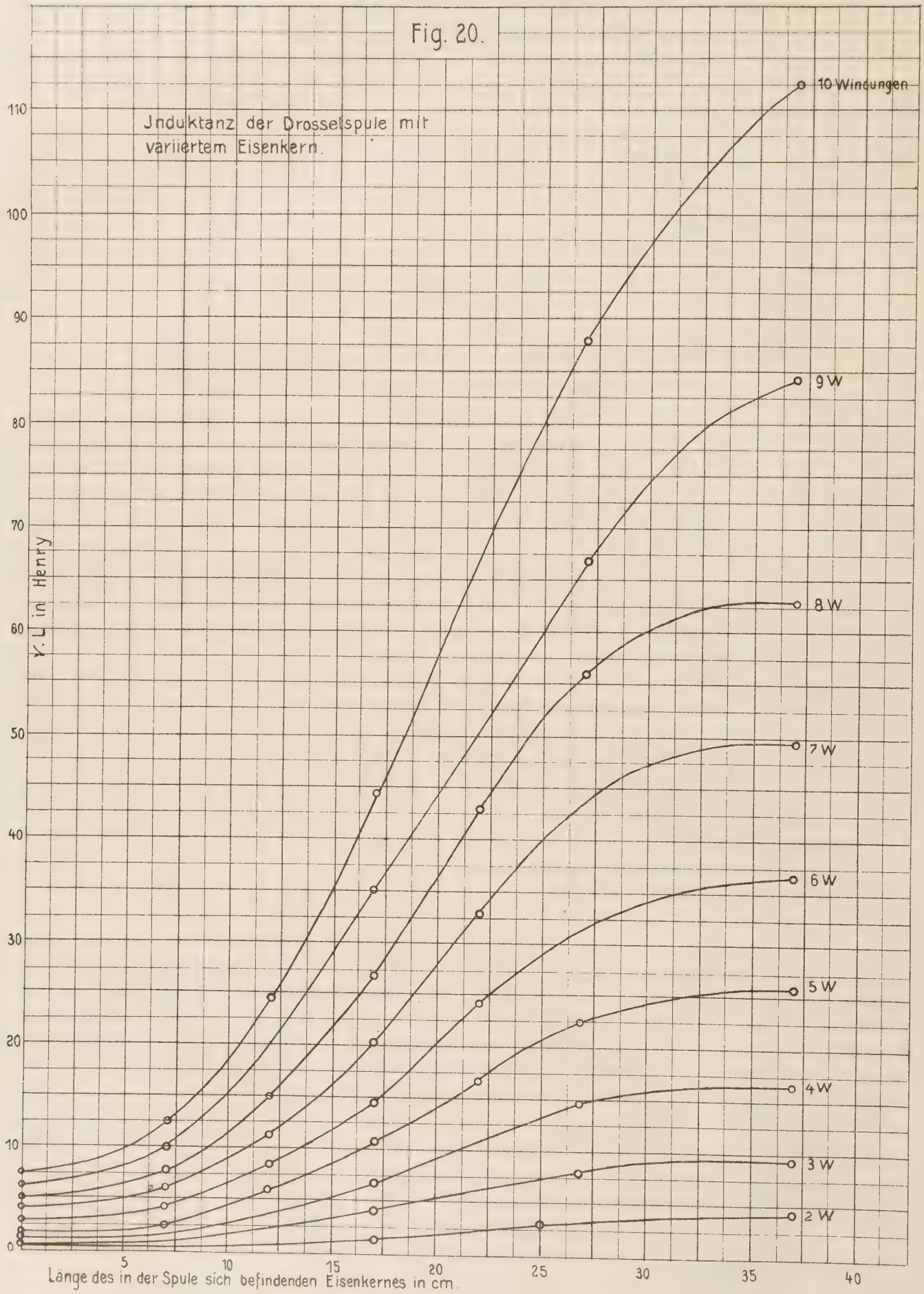
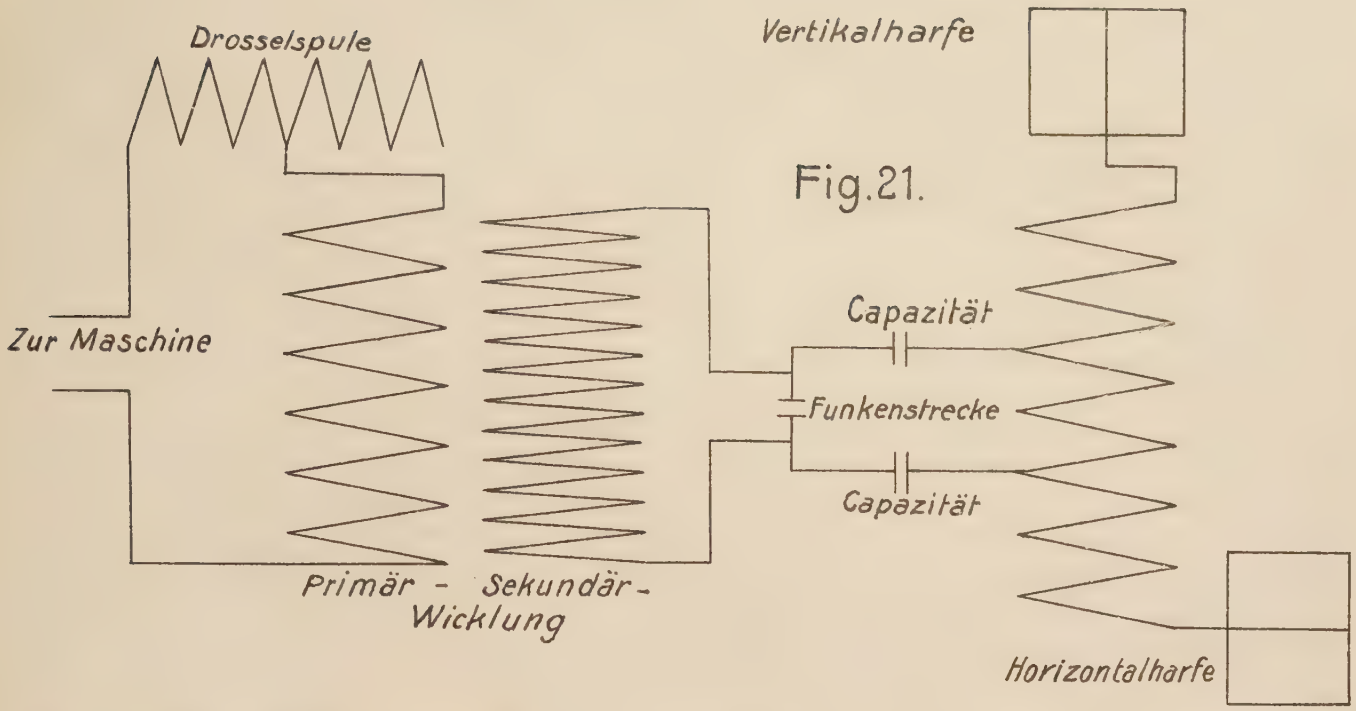


Fig. 20.
Jnduktanz der Drosselspule mit variiertem Eisenkern.
10 Windungen
9 W
8 W
7 W
6 W
5 W
4 W
3 W
2 W
K. L in Henry
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
5
10
15
20
25
30
35
40
Länge des in der Spule sich befindenden Eisenkernes in cm.

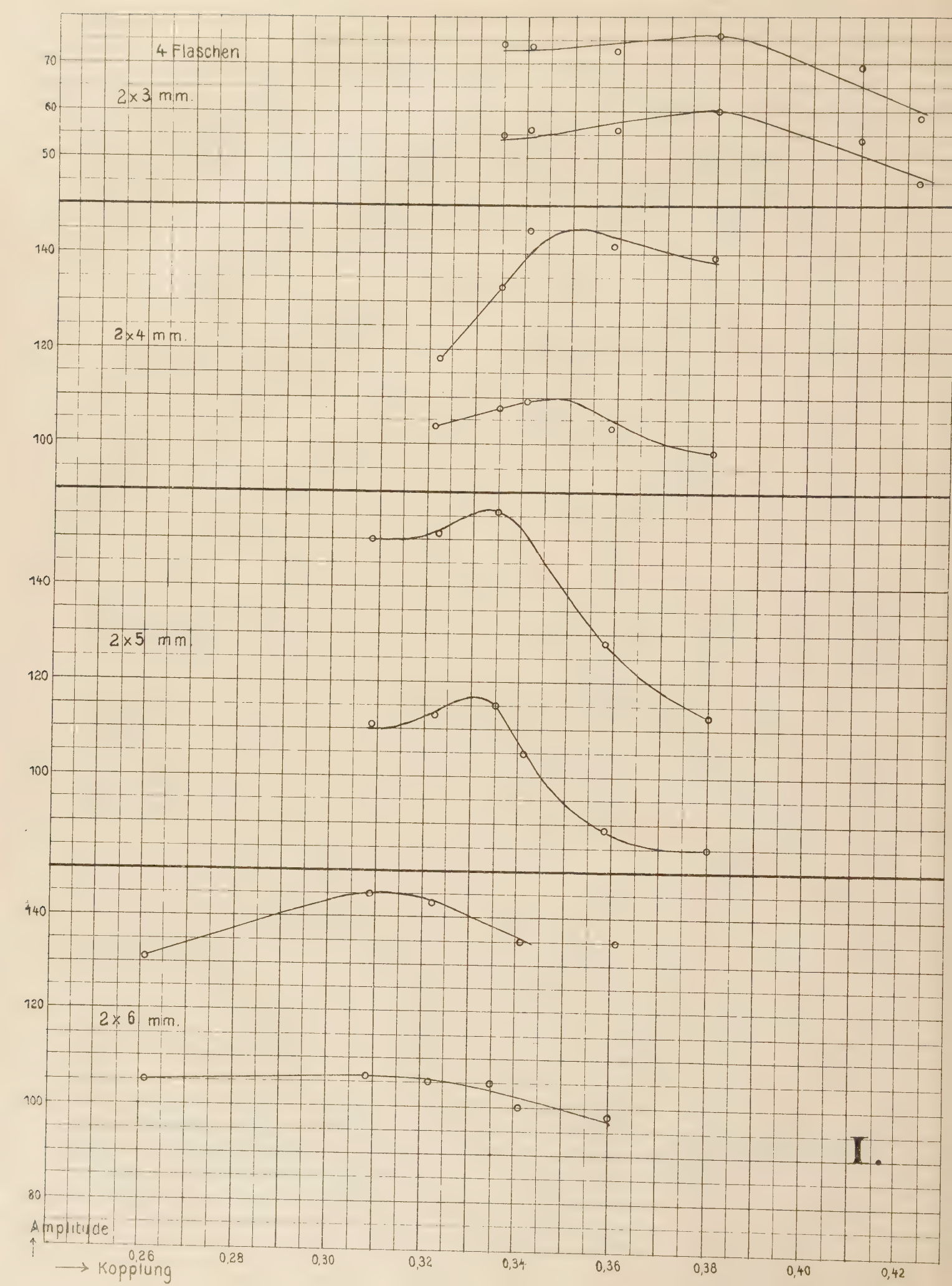


zur Funkenstrecke geschaltet waren und eine Gesamtkapazität von 10000 cm besitzen. Dann wurde auch für sechs solcher Flaschen mit einer Gesamtkapazität von 15000 cm die günstigste Kopplung festgestellt. Bei den ersten Beobachtungen zeigte sich, dass mit verschiedener Funkenlänge bei sonst gleichen Verhältnissen auch die günstigste Kopplung eine andere wird. Es wurde deshalb dieser Erscheinung bei den Versuchen auch Rechnung getragen.

Die Kopplung der Induktorspulen war beim ersten Versuch fest. Die Funkenlänge betrug 2×5 mm. Eingeschaltet waren dabei zwei Windungen der Drosselspule im Primärkreis, der Eisenkern war symmetrisch in die Spule eingeschoben. Bei dieser Kopplung wurde in beiden Stationen eine Resonanzkurve aufgenommen. Nun wurde die Kopplung des primären und sekundären Induktorkreises loser gemacht durch Vergrösserung der Induktanz der Drosselspule. So wurde für eine Anzahl Kopplungen die Intensität in der Sende- und Empfangsantenne festgestellt. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über diesen Versuch.

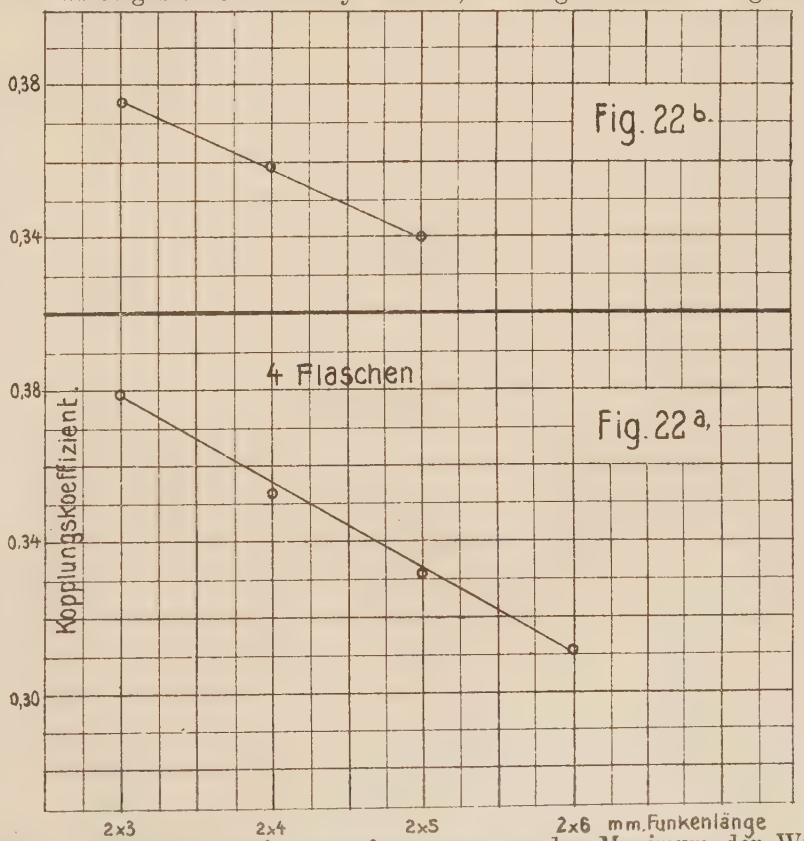
Intensität in der Empfangsantenne	Intensität in der Sendeantenne	I_1 in Ampère	I_2	Erregung der Wechselstrommaschine in Ampère	Stromstärke des Motors in Ampère	Induktanz der Drosselspule in cm	Kopplungskoeffizient
113	85	4,5	36,5[1])	0,285	3,0	$1{,}4 \cdot 10^7$	0,380
128	97	„	41,5	0,35	3,1	$2{,}3 \cdot 10^7$	0,359
138	106	„	44,5	0,41	3,1	$3{,}1 \cdot 10^7$	0,341
156	115	„	50	0,46	3,3	$3{,}5 \cdot 10^7$	0,335
153	113	„	49	0,50	3,2	$4{,}3 \cdot 10^7$	0,322
150	111	„	49	0,56	3,2	$5{,}0 \cdot 10^7$	0,309

1) I_2 wurde relativ gemessen mittels eines geshunteten Hitzdrahtinstrumentes. Die Zahlen geben die Ausschläge dieses Instrumentes an.


4 Flaschen
2 x 3 mm.
2 x 4 mm.
2 x 5 mm.
2 x 6 mm.
70
60
50
140
120
100
140
120
100
140
120
100
80
Amplitude
0,26
0,28
0,30
0,32
0,34
0,36
0,38
0,40
0,42
Kopplung
I.

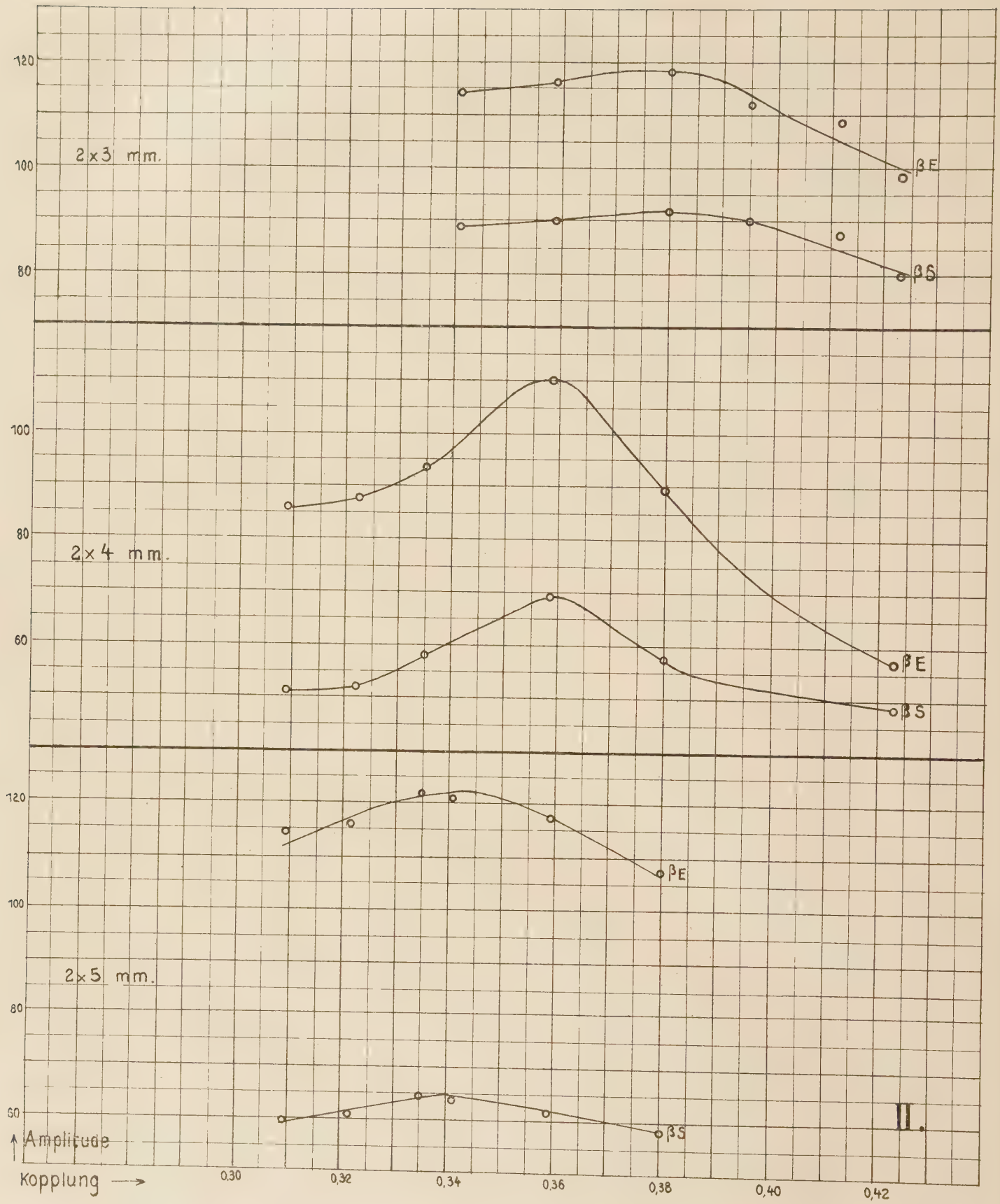
Die erste Spalte gibt die Wirkung in der Empfangsantenne an. Die Zahlen bedeuten die aus den aufgenommenen Resonanzkurven ermittelten maximalen Galvanometerausschläge; ebenso stellt die zweite Spalte den Verlauf der Energie in der Sendeantenne dar. In beiden Antennen stellt sich bei einer Kopplung von ca. 0,335 ein Optimum der Wirkung ein. Auch die Stromstärke I_2 des sekundären Kreises zeigt bei dieser Kopplung einen grössten Wert. Die Erregung der Wechselstrommaschine zeigt ein stetes Zunehmen. Das erklärt sich daraus, dass durch Zuschalten von Windungen der Drosselspule die Stromstärke herabgedrückt wird. Um aber dieselbe konstante Stromstärke I_1 zu haben, muss die Erregung entsprechend verstärkt werden.

Genau derselbe Versuch wurde gemacht für Funkenlängen von 2×3 mm, 2×4 mm und 2×6 mm. Auch hier zeigte sich, dass bei einer bestimmten Kopplung der beiden Induktorkreise die Intensität in der Sende- und Empfangsantenne ein Maximum aufwies. Auf Tafel I sind die Resultate der Versuchsreihen graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Koeffizienten der Induktorkopplung aufgetragen, als Ordinaten die maximalen Ausschläge des Galvanometers in der Sende- und Empfangsstation. Die obere Kurve gibt den Verlauf der Intensität in der Empfangsantenne an, die untere gilt für die Sendestation. Die obere Kurve gibt den Verlauf der Intensität in der Empfangsantenne an, die untere gilt für die Sendestation. Für beide ist das Resultat genau dasselbe. Die Figur zeigt, dass die günstigsten Kopplungswerte für die einzelnen Funkenlängen von einander abweichen, und zwar muss die Kopplung bei kleineren Funkenstrecken enger sein als bei grösseren, um das Maximum der Wirkung zu erreichen. Mit zunehmender Funkenlänge nimmt die günstigste Kopplung ab. Diese Abhängigkeit stellt sich als eine lineare heraus. Trägt man nämlich die Funkenlängen als Abszissen, die zugehörigen günstigsten Kopplungswerte als Ordinaten in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so ergibt sich eine gerade Linie, wie Fig. 22a zeigt.



Die Versuche wurden sehr oft wiederholt, sind aber ziemlich schwierig, weil die geringsten Spannungsschwankungen im Motor- oder Erregerstrom das Resultat verwischen. Doch gelang es, dieselben mehrmals einwandfrei durchzuführen. Auf Tafel II sind die Resultate einer Kontrolluntersuchung wieder graphisch dargestellt. Werden dann die Funkenlängen wieder als Abszissen und die günstigsten Kopplungskoeffizienten als Ordinaten abgetragen, so resultiert abermals eine gerade Linie, die in Fig. 22b dargestellt ist.

Die Erklärung des Auftretens eines günstigsten Kopplungskoeffizienten ist begründet durch die Rückwirkung des Sekundärkreises des Induktors auf den Primärkreis. Diese Rückwirkung wird umso stärker sein, je grösser die Energie in dem sekundären Kreise ist. Daraus folgt, dass auch mit zunehmender Funkenlänge die Kopplung weiter werden muss, um das Maximum der Wirkung zu erreichen; denn bei grösseren Funkenstrecken wird die Potentialdifferenz der Flaschenbelegungen grösser, die Energie des Sekundärkreises wird erhöht, er wirkt also stärker auf den ersten


120
100
80
2×3 mm.
βE
βS
100
80
60
2×4 mm.
βE
βS
120
100
80
60
2×5 mm.
βE
βS
Amplitude
Kopplung →
0,30
0,32
0,34
0,36
0,38
0,40
0,42
II.

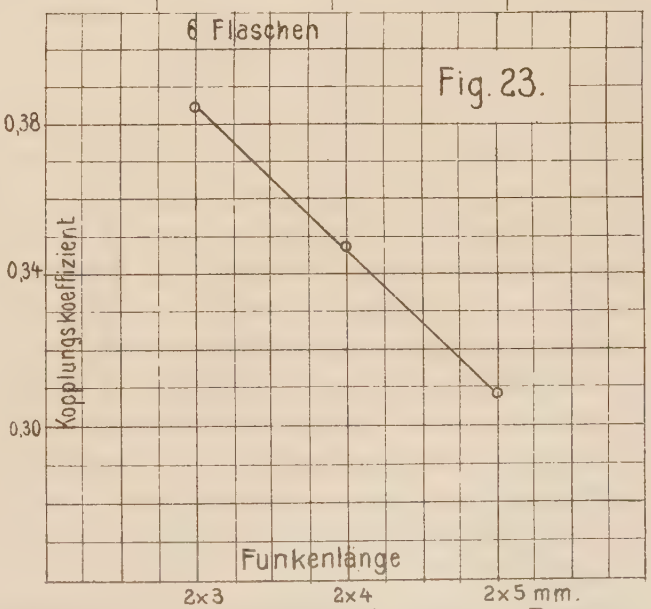
Kreis zurück. Daher muss die Kopplung mit grösserer Funkenstrecke auch weiter werden, bevor das Optimum erreicht wird.

Es wurde noch versucht, mit grösseren Funkenlängen zu arbeiten, doch führten die Versuche da zu keinem Resultate. Es war nicht möglich, eine genügend weite Kopplung zu erlangen. Infolge der Drosselwirkung der Induktionsspule musste die Erregung sehr erhöht werden, um die konstante primäre Stromstärke wiederzuerlangen. Die Leistungsfähigkeit der benutzten Maschine setzte da bald eine Grenze.

Ganz analoge Versuche wurden nun auch mit einer grösseren Kapazität im Sekundärkreis angestellt. Es wurden sechs Leydener Flaschen eingeschaltet mit einer Gesamtkapazität von 15000 cm. Es konnten hier aber nur drei verschiedene Funkenlängen untersucht werden, weil aus dem oben angegebenen Grunde für die primäre Stromstärke bei grösseren Funkenlängen der konstante Wert nicht mehr zu erreichen war. Es wurden nur die Funkenlängen 2×3 mm, 2×4 mm und noch 2×5 mm untersucht. In der folgenden Tabelle sind die Verhältnisse bei der Versuchsreihe mit einer Funkenstrecke von 2×4 mm angegeben.

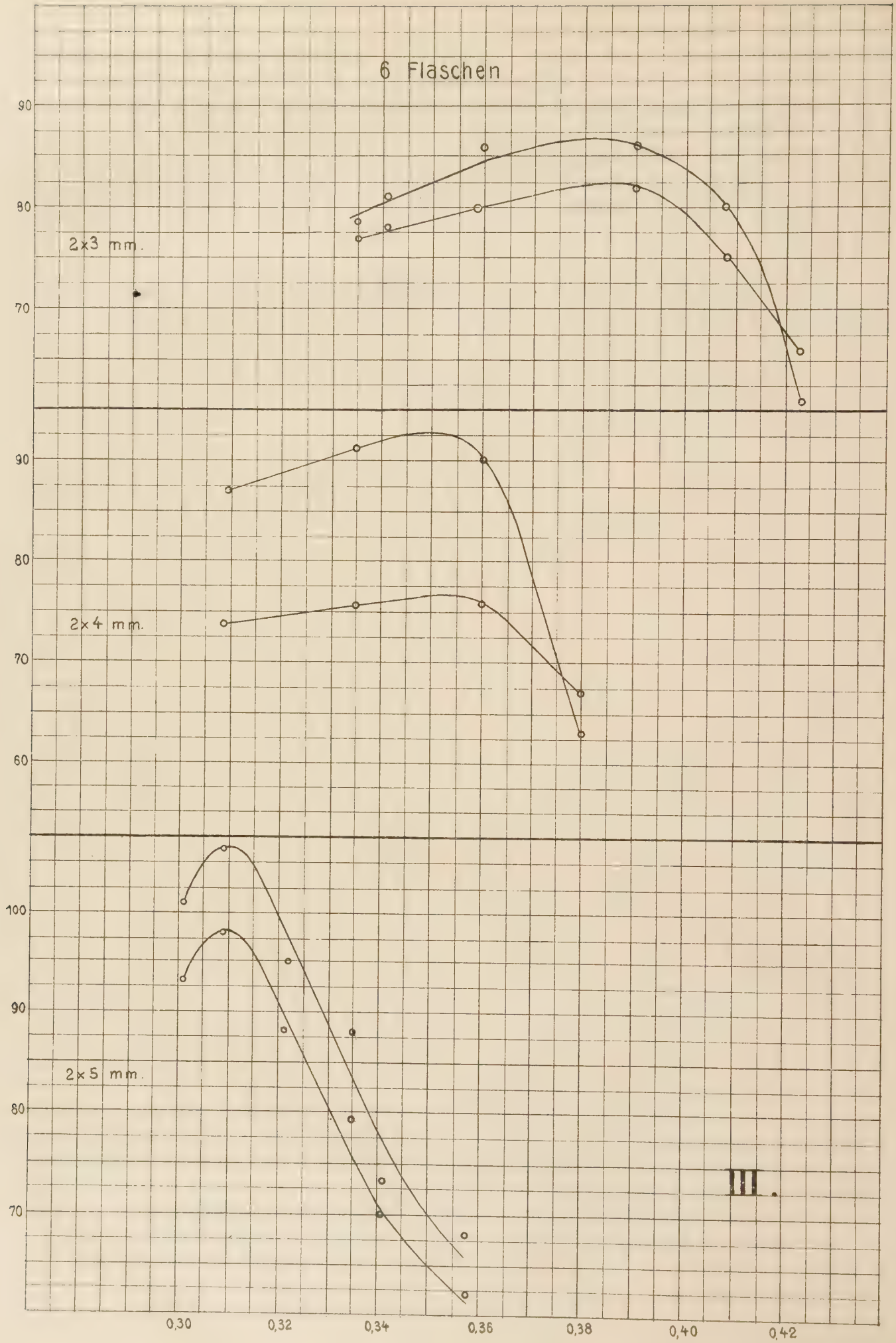
Intensität in der Empfangsantenne	Intensität in der Sendeantenne	I_1 in Ampère	I_2 in Ampère	Erregung der Wechselstrommaschine in Ampère	Stromstärke im Motor in Ampère	Induktanz der Drosselspule in cm	Kopplungskoeffizient
56	54	5	1,0	0,220	2,7	$0{,}2 \cdot 10^7$	0,422
67	63	„	1,15	0,285	2,8	$1{,}4 \cdot 10^7$	0,380
76	90	„	1,30	0,395	2,9	$2{,}3 \cdot 10^7$	0,360
76	92	„	1,33	0,450	3	$3{,}1 \cdot 10^7$	0,341
76	92	„	1,33	0,470	2,0	$3{,}5 \cdot 10^7$	0,335
73,5	87	„	1,30	0,520	2,8	$4{,}3 \cdot 10^7$	0,309

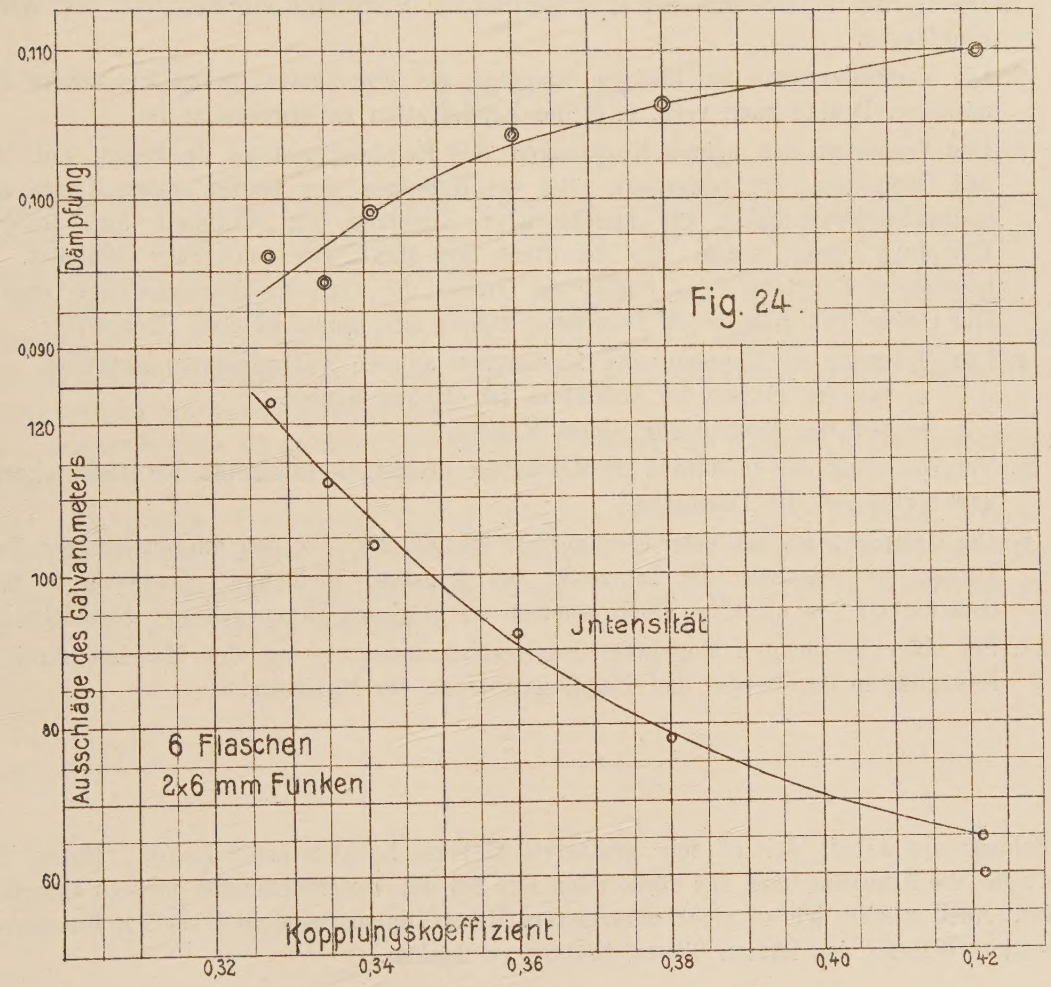
Es zeigt sich auch hier eine maximale Wirkung in der Empfangs- und Sendeantenne. Auch die übrigen Grössen zeigen qualitativ ein ganz analoges Verhalten wie vorher. Die Untersuchungen der anderen Funkenlängen weisen auch ein Optimum der Kopplung auf. Die Resultate sind auf Tafel III graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Kopplungskoeffizienten abgetragen, als Ordinaten die Ausschläge des Galvanometers in der Sende- und Empfangsstation. Auch hier nimmt die günstigste Kopplung mit zunehmender Funkenlänge ab, wie aus der Fig. 23 zu ersehen ist, und zwar ist in dem untersuchten Intervall diese Abhängigkeit linear.



Es war nun noch von Interesse, das Verhalten der Dämpfung bei variabler Kopplung des Induktors festzustellen. Zu diesem Zwecke wurden bei 6 Flaschen bei einer Versuchsreihe mit 2×6 mm Funken in der Empfangsstation genaue Resonanzkurven aufgenommen, aus denen die Dämpfungsdekremente berechnet wurden. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Kopplung im Induktor das Dämpfungsdekrement auch zunimmt. In Fig. 24 sind die Kopplungskoeffizienten als Abszissen, die Intensität und Dämpfung als Ordinaten abgetragen.

Es konnte bei dieser Versuchsreihe die Kopplung nicht genügend lose gemacht werden, um das Optimum zu erreichen.


6 Flaschen
90
80
70
2x3 mm.
90
80
70
60
2x4 mm.
100
90
80
70
2x5 mm.
III.
0,30
0,32
0,34
0,36
0,38
0,40
0,42


0,110
0,100
0,090
Dämpfung
120
100
80
60
Ausschläge des Galvanometers
Fig. 24.
Intensität
6 Flaschen
2x6 mm Funken
Kopplungskoeffizient
0,32
0,34
0,36
0,38
0,40
0,42

Zusammenfassung.

Die mitgeteilten Untersuchungen haben folgende Resultate ergeben:

1. Die Horizontalharfe gibt bei einer bestimmten Höhenlage ein Maximum der Wirkung im Empfänger.
2. Die Vertikalantenne ist für den Empfang am günstigsten, wenn das untere Ende der mittleren Drähte nach vorn, d. h. der Sendestation zu abgespannt ist.
3. Das Verhalten der beiden Kopplungen des Empfangssystems in Bezug auf Intensität und Dämpfung wird festgelegt. Bei der Kopplung der beiden ersten Kreise weist der Galvanometerausschlag mit abnehmender Kopplung ein Maximum auf, während die Dämpfung zuerst stark, von der Stelle des Maximums schwächer abnimmt. Mit abnehmender Kopplung $^{II}/_{III}$ nimmt die Grösse der Galvanometerausschläge dauernd ab. Die Grösse der gemessenen Dämpfung nähert sich einem unteren Grenzwert.
4. Das Optimum der Kopplung des Messkreises an den Antennenkreis hängt ab
   a) von der Grösse der Induktanz im offenen Kreise,
   b) von der Abstimmung dieses Kreises.
5. Vergrösserung der Induktanz im Messkreise drückt die Intensität der Messwirkung herab und verkleinert die Dämpfung.
6. Die Dämpfung ist mit einer Genauigkeit von ca. $2\,^0/_0$ aus den aufgenommenen Resonanzkurven zu ermitteln, die Intensität bei konstant bleibender Sendeenergie mit einer Genauigkeit von ca. $1\,^0/_0$. Doch kommen an gewissen Tagen grössere Abweichungen vor.
7. Bei einer bestimmten Kopplung des Resonanzinduktors an den Maschinenkreis ist die Intensität in der Sende- und Empfangsantenne ein Maximum.

Am Schluss der Arbeit sei es mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Schmidt, für die Anregung und den fördernden Rat bei den Untersuchungen meinen ehrerbietigsten Dank zu sagen. Auch möchte ich es nicht unterlassen, Herrn Diplomingenieur Ullrich für seine Unterstützung, besonders betreffs des letzten Teiles, bestens zu danken.

Lebenslauf.

Geboren bin ich, Gustav Peter Karl Heinecke, evangelischer Konfession, am 1. August 1885 zu Magdeburg. Meine erste Schulbildung genoss ich auf der III. Bürgerschule zu Magdeburg. Von Ostern 1896 ab besuchte ich die städtische Realschule, die ich Ostern 1902 mit der Berechtigung zum einjährig-freiwilligen Militärdienst verliess, um zur Guerickeschule (Oberrealschule) überzugehen. Hier bestand ich Ostern 1905 die Reifeprüfung. Ich widmete mich nun in Halle a. S. dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften. Meine ganze bisherige Studienzeit brachte ich in Halle zu. Am 4. Mai 1909 bestand ich das Examen rigorosum.

Teilgenommen habe ich an den Vorlesungen, Seminarien und Übungen folgender Herren Professoren und Dozenten:

Abert, Bernstein, Buchholz, Cantor, Dorn, Ebbinghaus, Eberhard, Fries, Gutzmer, Luedecke, Robert, Schmidt, Uphues, Volhard, Vorländer, Walter, Wangerin.

Allen meinen Lehrern, besonders den Herren Professoren Gutzmer und Schmidt werde ich mich stets als dankbarer Schüler erinnern.